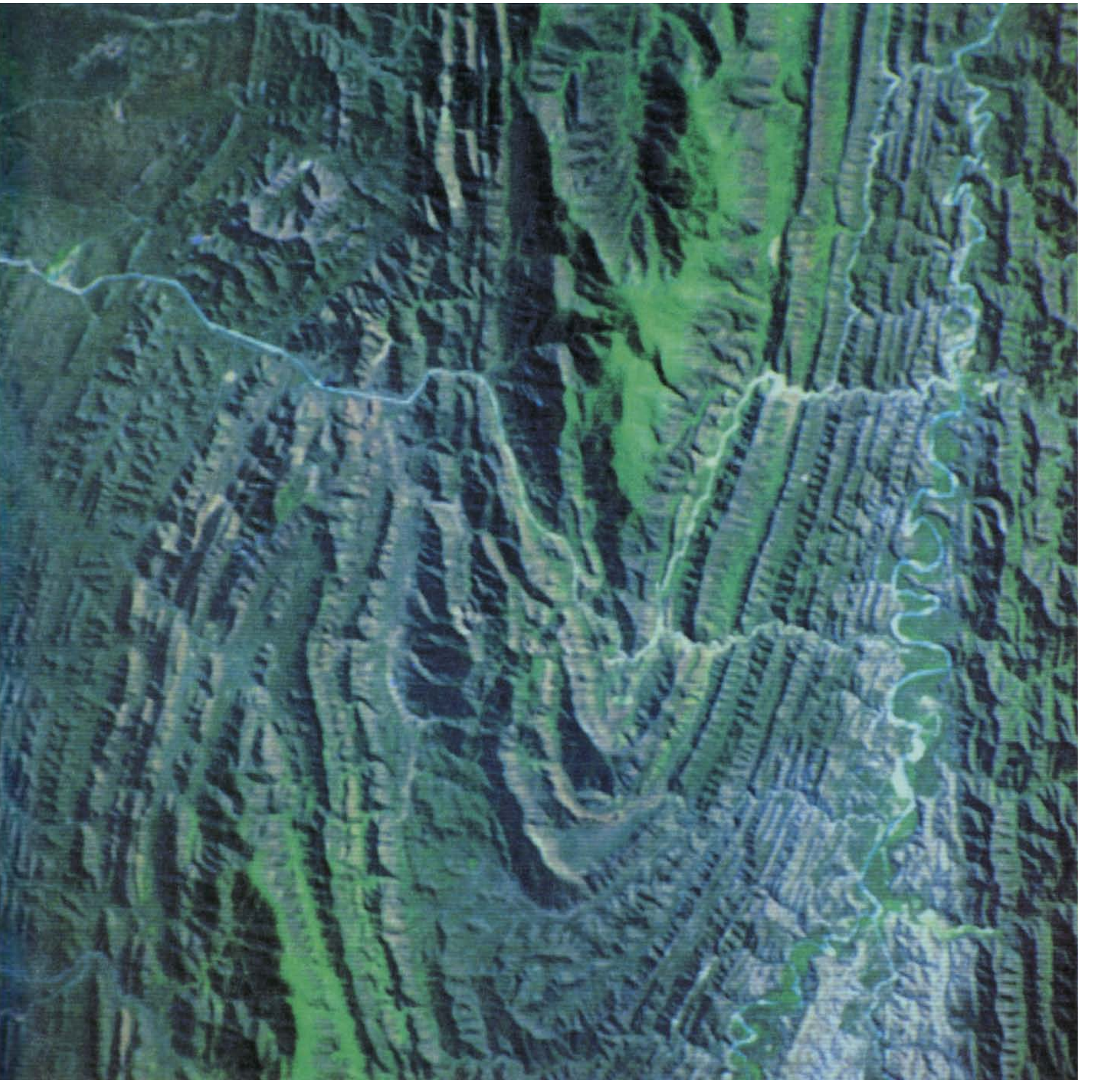
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**



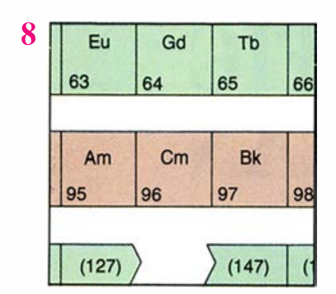
PREVISION SISMICA

Agosto 1989
500 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Agosto de 1989 Número 155

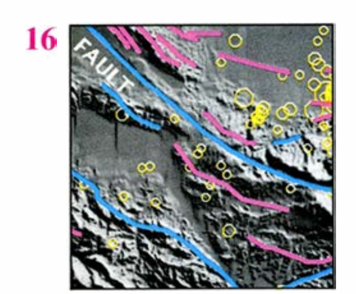
8



Los actínidos
León Garzón Ruipérez

Con el descubrimiento de la tabla periódica de los elementos, la química entró en el camino del rigor teórico. Para el autor, los actínidos muestran un comportamiento semejante a los elementos de transición y diferente de los lantánidos. Esa característica permite establecer una nueva ordenación de los elementos del séptimo período.

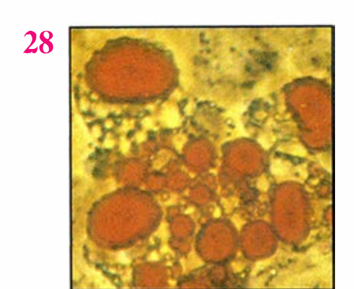
16



Previsión sísmica
Ross S. Stein y Robert S. Yeats

Los sismólogos nos han enseñado a asociar los terremotos con líneas de falla visibles. Pero hay otras fuentes de temblores catastróficos cuya fuente se halla oculta a la vista. El seísmo reciente de Armenia, por ejemplo, provocó la liberación de fuertes tensiones que se ejercían a grandes profundidades.

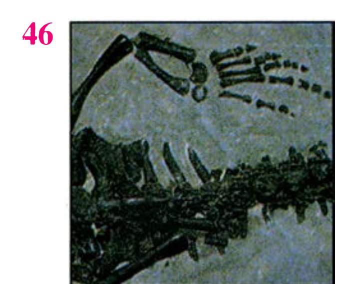
28



Una herencia distinta
Robin Holliday

No es genética sino epigenética. No se ocupa de los genes, sino de su función. Controla los cánones de actividad génica y su transmisión de una generación celular a la siguiente, coadyuvando así a la ejecución del programa de desarrollo. La unión de grupos metilo (CH_3) al ADN podría encerrar la clave de esa herencia distinta.

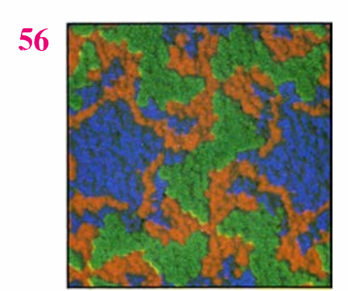
46



Fósiles del monte de San Giorgio
Toni Bürgin, Olivier Rieppel, P. Martin Sander y Karl Tschanz

Hace 200 millones de años, la actual frontera entre Suiza e Italia estaba cubierta por un mar somero donde vivía una rica fauna de vertebrados. Sus fósiles, incrustados en las laderas de un monte próximo al lago Lugano, constituyen una ilustrativa instantánea en piedra de la vida animal en el Triásico.

56

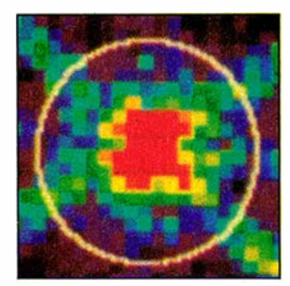


La transformación de Fourier
Ronald N. Bracewell

Para entender las transformadas, préstese atención al oído, dicen los matemáticos. Ese órgano las calcula de forma automática. Habilidad de la que carece el científico que ha de extraer el sentido de complejos flujos de información. Y así, mediante un ensamblaje de ondas sinusoidales, representa señales, sonidos o la conducción del calor.

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

66



El encauzamiento de electrones y positrones
Allan H. Sørensen y Erik Uggerhøj

Cuando un haz focalizado de partículas cargadas incide, desde cierto ángulo, sobre un cristal, aquéllas se canalizan por la red como si fueran bolas que discurren por un reguero. Los estudios del encauzamiento proporcionan información de la estructura del cristal y de las reacciones nucleares.

74



Autenticidad de las esculturas antiguas de mármol
Stanley V. Margolis

¿En qué se distingue una escultura genuina de la antigüedad clásica de una imitación renacentista o moderna? El autor de este artículo, que no es historiador del arte, sino geoquímico, ha creado el método adecuado para develar el engaño mediante la aplicación de técnicas desarrolladas para datar las muestras de los sedimentos del fondo oceánico.

82

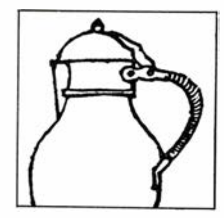


Absenta
Wilfred Niels Arnold

La tuyona, el ingrediente activo tóxico del licor verde pálido, inspiró a los pintores impresionistas y a los poetas simbolistas del siglo XIX europeo. La investigación médica puso al descubierto los peligros de la absenta y se prohibió su venta y consumo. En la actualidad tenemos que conformarnos con Pernod.

SECCIONES

4



Hace...

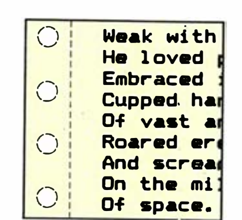
Ciento cincuenta años se introduce en España la fotografía científica.

38 **Ciencia y sociedad**

42 **Ciencia y empresa**

90 **Taller y laboratorio**

95



Juegos de ordenador

¿Pueden "crear" los ordenadores? Se les puede programar para escribir prosa o poesía.

99 **Libros**

104 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Josep Gallart: *Previsión sísmica*; Santiago Torres: *Una herencia distinta*; Elisa Villa: *Fósiles del monte de San Giorgio*; Luis Bou: *La transformación de Fourier y Juegos de ordenador*; Ramón Pascual: *El encauzamiento de electrones y positrones*; Eliseo Asso: *Autenticidad de las esculturas antiguas de mármol*; José Antonio Pérez y Angeles Linde: *Absenta*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Juan Carlos Carracedo, Ester Boix y Josep-Enric Llebot

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Laureano Carbonell, Amador Schüller, Cayetano López y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
9-15	León Garzón y Antonio Aragón
16-17	John E. Estrem, Ross S. Stein, Jerry P. Eaton y Raymond M. Batson
18	Ross S. Stein (*arriba*), Hank Iken (*abajo*)
19-22	Hank Iken
23	John E. Estrem y Ross S. Stein
24-25	Timothy B. Smith, Robert V. Sharp, Roger D. Borcherdt, David W. Simpson y Ross S. Stein
29	Shirley M. Taylor, Lesley A. Michalowsky y Peter A. Jones, Universidad de California del Sur, Facultad de Medicina
30-35	George V. Kelvin
46-47	Instituto y Museo de Paleontología de la Universidad de Zurich
48	Tom Prentiss
49	I. y M. de Paleontología, Zurich (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
50-51	I. y M. de Paleontología, Zurich
54	I. y M. de Paleontología, Zurich (*arriba*), Tom Prentiss (*abajo*)
55	Tom Prentiss (*arriba y abajo*), I. y M. de Paleontología, Zurich (*centro*)
57	Quesada/Burke (*arriba*), Thomas C. Moore (*abajo*)
58-59	Thomas C. Moore
60	Quesada/Burke
62	Thomas C. Moore
63	Michael G. Rossmann y Sharon S. Wilder, Univ. de Purdue
67	Allan H. Sørensen
68-72	Ian Worpole
75	Stanley V. Margolis
76	Museo J. Paul Getty
77	George Retsek
78	Stanley V. Margolis
79	George Retsek
80	George Retsek (*arriba*), Museo J. Paul Getty (*abajo*)
83	Museo de Arte de Cleveland, Colección Hinman B. Hurlbut
84	Wilfred Niels Arnold, cortesía de Linda Hall Library, Kansas City
85	Wilfred Niels Arnold y Louise M. Arnold (*arriba*), Museo de Seagram (*abajo*)
86	Johnny Johnson
88	S. Varnedoe
91-94	Michael Goodman
95-98	Edward Bell



La fotografía de la portada, elaborada con datos recogidos en la cartografía temática del Landsat y con definición de color según el proyecto Cornell Andes, muestra un terreno fuertemente plegado en el cinturón subandino boliviano [véase "Previsión sísmica" por Ross S. Stein y Robert S. Yeats, en este número]. Esta región sísmicamente activa cerca de la frontera boliviano-argentina no ha conocido grandes terremotos. Sin embargo, los plegamientos crecientes pueden disimular fallas ocultas y son, por tanto, emplazamientos potenciales de grandes terremotos.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Purificación Mayoral Martínez
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono 322 05 51 Telefax 410 79 12

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., Managing Editor; Timothy Appenzeller, Associate Editor; Timothy M. Beardsley; John M. Benditt; Laurie Burnham; Elizabeth Corcoran; Ari W. Epstein; Gregory R. Greenwell; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, Book Editor; Tony Rothman; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Karen Wright
PUBLISHER Harry Myers
ADVERTISING DIRECTOR Peter B. Kennedy
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Thaïs Muñoz Oliva
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S. A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

José M.ª López Piñero

...*ciento cincuenta años*

El médico Pedro Felipe Monlau fue el principal introductor científico de la fotografía en España. Tal como ha puesto de relieve Marie-Loup Sougez, a finales de febrero de 1839, solamente mes y medio después de que François Arago leyera su primer informe sobre el daguerrotipo en la Académie des Sciences, de París, Monlau, que entonces estaba en la capital francesa, envió una comunicación sobre el tema a la Real Academia de Ciencias y Artes, de Barcelona. En junio del mismo año presentó una nueva comunicación a la misma academia y en diciembre publicó un artículo sobre el daguerrotipo en la revista *El Museo de Familias*.

Monlau es principalmente conocido como una de las grandes figuras de la higiene en la España de las décadas centrales del siglo XIX. Nació en Barcelona en 1808 y se formó como médico en el Colegio de Medicina y Cirugía de la capital catalana, donde obtuvo el título de licenciado en 1831 y el de doctor dos años después. Con anterioridad había cursado, entre otros estudios, los cursos de física, química y botánica que impartía la Junta de Comercio de Cataluña. Más tarde, consiguió el grado de bachiller (1847) y de licenciado en filosofía (1849) en la Universidad de Madrid.

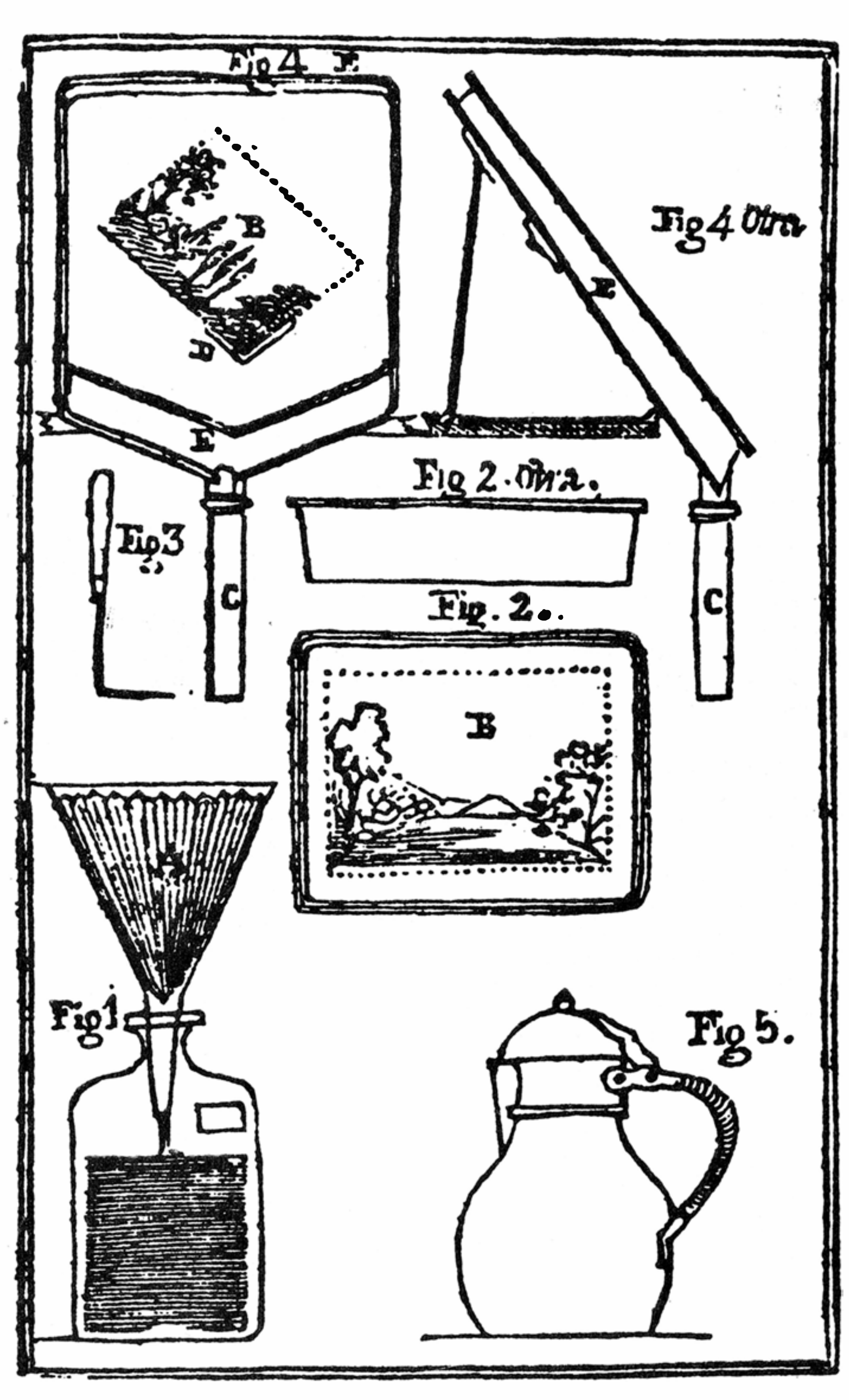
Desde 1833 hasta 1848, Monlau perteneció al cuerpo de sanidad militar, aunque simultaneó su dedicación como médico con una intensa actividad política e intelectual. Era entonces un apasionado partidario del liberalismo progresista, por el que combatió como redactor o director de diversos diarios y revistas. Por otra parte, fue profesor de geografía y cronología en la Academia de Ciencias Naturales y Artes, de Barcelona, y desempeñó la cátedra de literatura en la Universidad de Barcelona. Vivió en París durante 1838 y parte de 1839, época en la que viajó también a Londres. El resto de este período residió en la capital catalana hasta que, por motivos políticos, fue obligado, en 1844, a trasladarse a Valencia, ciudad en la que estuvo más de dos años.

En 1848, Monlau pidió la excedencia en el cuerpo de sanidad militar, tras ganar por oposición la cátedra de psicología y lógica en el Instituto de San Isidro, de Madrid. A partir de entonces vivió en Madrid, siendo titular de la cátedra citada hasta 1857, fecha en la que pasó a ocupar la de "latín de los tiempos medios y castellano, lemosín y gallego antiguos" en la Escuela Diplomática. Fue también encargado de la cátedra de higiene de la Facultad de Medicina de la Universidad de Madrid en enero de 1854, pero cesó en octubre del mismo año. La medicina preventiva constituyó, sin embargo, el aspecto de mayor importancia de su polifacética actividad. A partir de 1847 estuvo asociado de distintas formas al Consejo de Sanidad del Reino, convirtiéndose en la práctica en un discípulo de Mateo Seoane. Perteneció a diversas comisiones, hasta que en 1855 fue nombrado consejero de número. Por otra parte, fue el delegado médico español en la primera Conferencia Sanitaria Internacional, celebrada en París en 1851, así como en la segunda que tuvo lugar ocho años más tarde.

Monlau fue autor de una amplísima obra escrita, que incluye más de medio centenar de libros y casi doscientos artículos, originales o traducidos, consagrados a temas muy diversos: literatura de creación, estudios literarios, lexicografía, historia, economía, psicología, medicina, etc. Entre todos ellos, destacan, por su altura e influencia, los relacionados con la medicina preventiva. Las tres ediciones de sus *Elementos de higiene pública* (1847, 1862 y 1871) ofrecieron a los médicos españoles una síntesis rigurosa y al día de la disciplina, en unas décadas decisivas. También publicó manuales de higiene privada (1846) e higiene del matrimonio (1853) extraordinariamente difundidos, una notable monografía sobre higiene industrial (1856) y la primera revista española dedicada a la educación sanitaria: *El monitor de la salud* (1858-1864). Tradujo además los tratados de higiene mental de Jean B. F. Descuret (1842) y Ernst von Feuchtersleben (1855), y redactó numerosos artículos e informes acerca de la materia, entre ellos, el primer *Rapport* internacional sobre higiene marítima (1851), como secretario de la comisión correspondiente en la conferencia de París.

En la obra de Monlau, está superada plenamente la limitación de la higiene pública a pura "policía médica" en el sentido de Johann Peter Frank, así como su confusión con la medicina legal y otros campos vecinos. A través de Seoane, recibió la influencia de las corrientes británicas y, por otra parte, asimiló la orientación francesa que podemos personificar en Michel Lévy. De acuerdo con los supuestos liberales, concibió la higiene pública como el ase-

soramiento de la medicina a la administración pública. Afirmó explícitamente que su función debe reducirse a garantizar la seguridad, la libertad, la comodidad y la salud de cada ciudadano, considerando como muy problemática la intervención estatal, en unos términos muy similares a los higienistas británicos influidos por Jeremy Bentham. Prestó notable atención al proletariado industrial, subrayando la serie de datos médico-sociales que contribuían a denunciar su dramática situación. Con notable objetividad, pero desde la perspectiva de la clase burguesa, examinó el problema con una actitud ante el progreso técnico muy alejada ya del ingenuo entusiasmo de los ilustrados. Falleció en Madrid el año 1871.



Grabado ilustrativo del artículo sobre el daguerrotipo publicado por Pedro Felipe Monlau en la revista El Museo de Familias *en diciembre de 1839.*

Los actínidos

Muestran un comportamiento semejante a los elementos de transición y diferente de los lantánidos. Esa característica permite establecer una nueva ordenación de los elementos del séptimo período

León Garzón Ruipérez

Debemos a Julius Lothar Meyer, de la Universidad de Karlsruhe, y a Dmitri Ivanovich Mendeliev, de la Universidad de San Petersburgo, el descubrimiento, hace poco más de un siglo, de la tabla periódica, hallazgo que catapultó la química a la categoría de disciplina científica. En su versión actual, la ley que subyace bajo dicha tabla establece que las propiedades de los elementos, así como la de sus combinaciones, varían periódicamente con el número atómico Z; este número, descubierto ya en 1913, corresponde al número ordinal de cada elemento en dicha tabla y representa el número de protones en el núcleo y, por tanto, el de electrones en la corteza. (El protón es una partícula de masa aproximadamente la unidad en la escala usual de masas atómicas y de carga positiva e igual, en valor absoluto, a la negativa del electrón.)

Solemos representar el sistema periódico mediante una tabla de doble entrada en la que las filas se llaman períodos y, grupos, las columnas. Hay siete períodos y 18 columnas. En razón de ese carácter periódico, los elementos de cada grupo, de la misma columna, poseen propiedades químicas semejantes; en lógica coherencia, la variación de las propiedades a lo largo de los períodos será semejante para todos ellos. Pero conviene aclarar en seguida que ese comportamiento resulta más convincente para los grupos, las columnas, IA, IIA, IIIA y siguientes hasta el de los gases inertes (inclusive) que para el resto. De ahí que la ley periódica no deba considerarse una ley exacta, sino sólo aproximada.

Las propiedades de los átomos y, en general, de los elementos o cuerpos simples constituidos por aquéllos vienen determinadas por sus estructuras electrónicas. (Así se llaman las disposiciones de los electrones en niveles discretos, no continuos, de energía.) Esas estructuras electrónicas varían en general, periódicamente, con el número atómico Z. Dicho de otro modo: la periodicidad de las propiedades es una consecuencia de la periodicidad de las estructuras. Matizamos "en general" porque existen algunas excepciones.

En el átomo, los electrones ocupan distintos niveles energéticos o capas, cada una de las cuales se caracteriza por el valor de un número llamado n; de este número cuántico principal, como también se le denomina, depende la energía asociada a cada electrón. Este número puede tomar los valores 1, 2, 3,. . . n. Dentro de cada capa, los electrones se distribuyen en subniveles, o subcapas, que se simbolizan o definen por un segundo número cuántico, l, al que se relaciona con el momento angular orbital del electrón; sus valores asignados van desde 0 hasta $n-1$, y se denota mediante los símbolos s, p, d, f, g y otros. Así, cuando el número cuántico principal, n, vale 1, el segundo número cuántico, l, vale 0; expresión totalmente equivalente a esta otra: estamos hablando del subnivel, u orbital, s del electrón. Si el número cuántico principal, n, se encuentra en un nivel superior, $n = 2$, los valores que el número cuántico secundario, l, asume son dos, a saber 0 y 1; expresado de otra manera: tenemos dos orbitales, el s y el p. Procediendo análogamente, iríamos descubriendo los demás orbitales para valores ascendentes de n.

La orientación de las órbitas de los electrones se halla también cuantizada, de modo que la proyección del número cuántico secundario l, que es un vector, sobre determinada dirección sólo puede tomar valores enteros, desde 1 a -1, cero incluido. (De esa inferencia queda excluido $l = 0$.) Llámase m_l a ese número cuántico. La cuantización espacial descrita determina que existan los siguientes orbitales $3p$, $5d$, $7f$, $9g$. En ausencia de la causa que provocó esa orientación, un campo magnético por ejemplo, la energía de los electrones de cada orbital sería la misma y nos encontraríamos en una situación de degeneración energética. Falta aún por citar un cuarto número cuántico, el simbolizado en m_s; se refiere éste al momento angular intrínseco del electrón, la proyección del cual sobre una dirección determinada sólo puede tomar los valores $+1/2$ y $-1/2$, en unidades $h/2\pi$; h es la constante de Planck, que significa el valor más pequeño de una magnitud llamada acción (la acción es igual a la energía multiplicada por el tiempo).

Salvo el primero de los átomos, el H, cualquier otro, con un valor arbitrario del número atómico Z, se puede construir, al menos formalmente, a partir del que ocupa el lugar precedente en la tabla, añadiendo simultáneamente un protón (y neutrones) al núcleo y un electrón a la corteza. Ese principio de construcción, conocido técnicamente con el término alemán *Aufbau*, plantea el problema de la existencia de un límite para Z y, por ende, para el elemento químico portador de ese número atómico. Dicho límite teórico se ha estimado en 173 [véase "Desintegración del vacío", por Lewis P. Fulcher, Jo-

LEON GARZON RUIPEREZ es catedrático de energía nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad de Oviedo. Diplomado por la Escuela de Isótopos y por la Escuela de Funcionamiento de Reactores de Harwell (Inglaterra), se formó en la Universidad de Salamanca y Madrid. El laboratorio del que es director viene manteniendo, desde hace unos 20 años, una estrecha colaboración con el Centro de Física Atómica e Intercambios Atmosféricos de la Universidad de Toulouse y ha llevado a cabo una serie de estudios acerca de la utilización de la radiactividad del aire en problemas de contaminación general.

hann Rafelski y Abraham Klein; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1980] y correspondería al quinto elemento de un hipotético noveno período.

El electrón añadido al átomo *Z* para construir el Z + 1 se aloja en el orbital disponible de menor energía, pues de este modo la configuración electrónica resultante, la estructura que llamábamos más arriba, es la más estable de todas las posibles; constituye esa condición la del estado fundamental. Amén de ese requisito deberá cumplirse el principio de exclusión de Pauli, así llamado en honor del físico austríaco Wolfgang Pauli, según el cual en un átomo no pueden coexistir dos o más electrones dotados de los mismos valores de los cuatro números cuánticos (n, l, m_l y m_s).

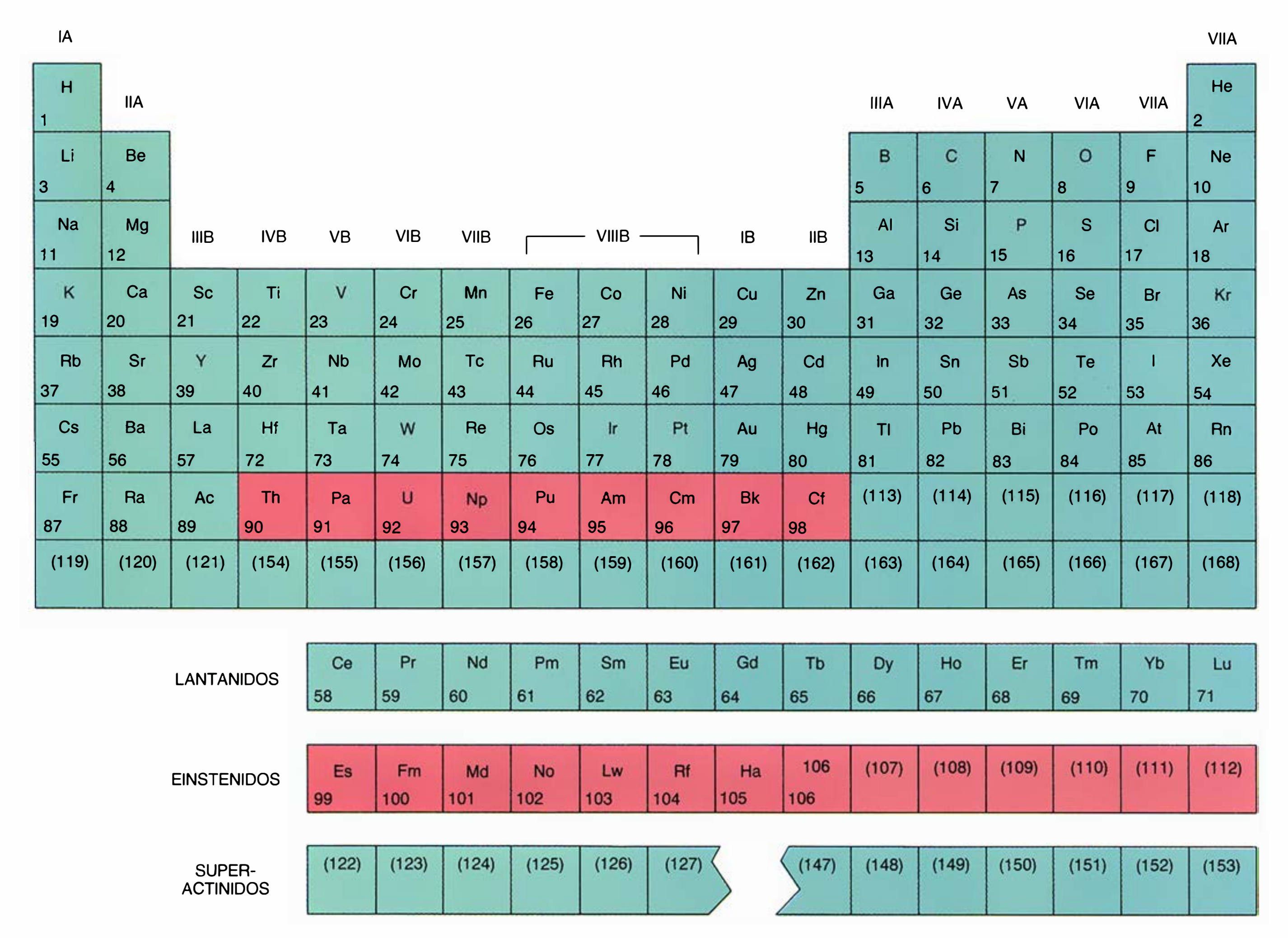
Para caracterizar cualquier orbital es necesario especificar los valores de los tres primeros números cuánticos citados. Ahora bien, como al electrón se le debe asignar, además, el número cuántico m_s, y éste sólo puede adoptar dos valores ($+1/2$ o $-1/2$ en unidades $h/2\pi$), resulta que, con objeto de no violar el principio de exclusión, el número máximo de electrones que pueden alojarse en un orbital se reduce a dos. Al ir añadiendo electrones se van ocupando los orbitales de cada capa hasta la saturación de todos los que pertenecen a la misma, lo que ocurre en el correspondiente átomo de gas noble, del que se dice que cierra capa.

En razón de los diferentes tipos de orbitales, podemos dividir los elementos químicos en tres grandes bloques: (s,p), d y f; se trata de los grupos representantivos y gases inertes, series de transición corta y series de transición interna, respectivamente.

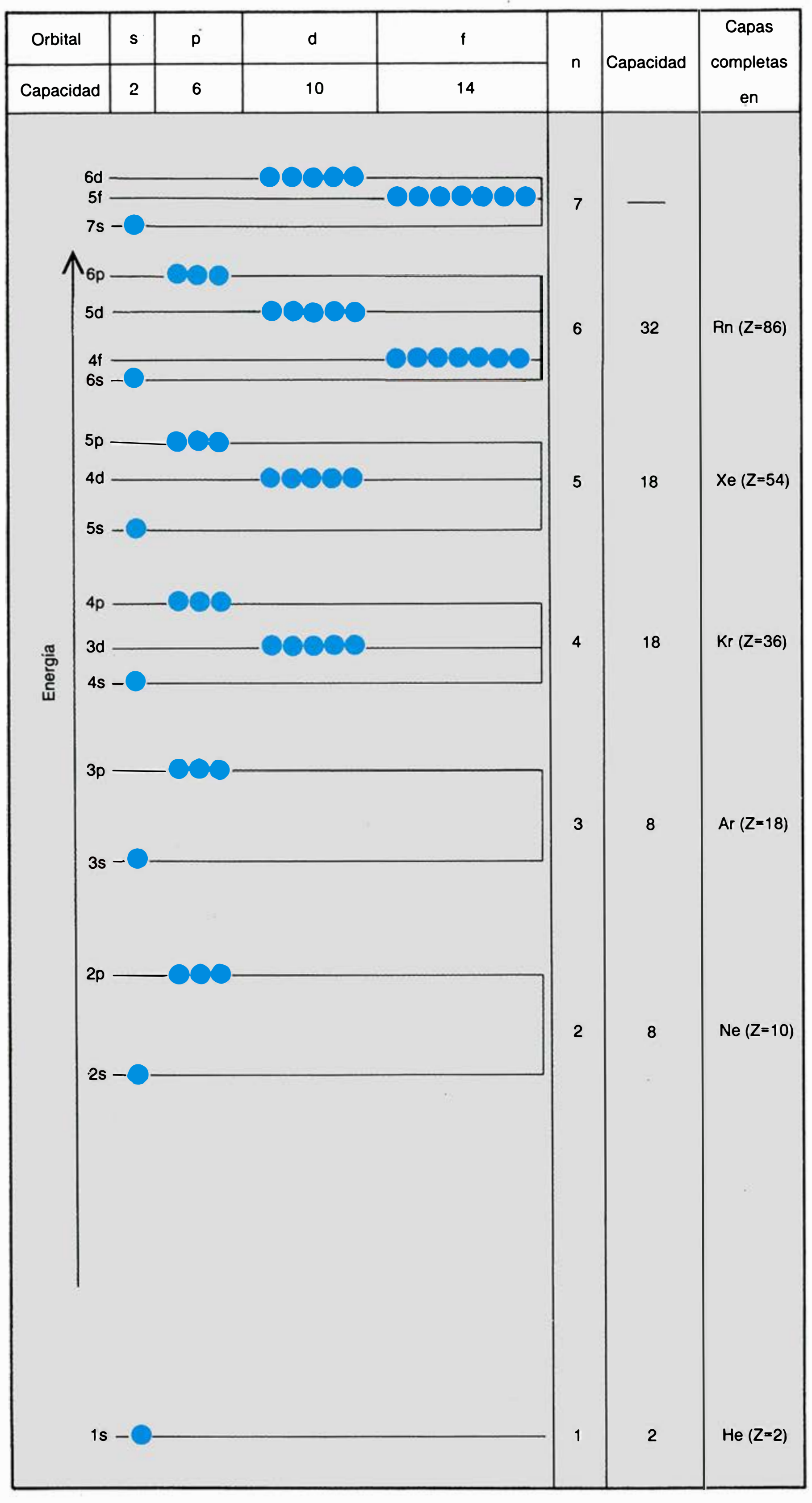
Los 14 elementos del bloque f pertenecientes al sexto período constituyen la serie de los lantánidos; los pertenecientes al período séptimo, la serie de los actínidos. Estos últimos son los elementos situados entre el torio, con número atómico 90, y el laurencio, con Z = 103, ambos inclusive.

En lo que sigue denotaremos por los símbolos ER(n), ET(n), EL y EA las series de elementos representativos y gases inertes, de transición, lantánidos y actínidos, respectivamente. El índice n, entre paréntesis, alude al número del período; así, ET(6) representa la tercera serie de transición, que pertenece al sexto período. EL y EA carecen de índice porque sólo poseen uno, el 6 y el 7 respectivamente.

El descubrimiento de la radiactividad en 1896 y, sobre todo, el de la fisión nuclear en 1938 originaron un alud de nuevos elementos. Justamente el estudio de la fisión permitió identificar y aislar varios elementos cuyo número atómico superaba el 92, por cuya razón



1. TABLA PERIODICA, en la nueva ordenación del séptimo período, de acuerdo con la hipótesis del artículo. Exige ésta que los elementos comprendidos entre el actinio y el californio, ambos inclusive, constituirían una cuarta serie de transición. Los lantánidos y einsténidos, siguiendo la costumbre habitual, figuran fuera de la tabla, junto con los superactínidos del hipotético octavo período. En dicha tabla puede observarse que los lantánidos y einsténidos constituyen series paralelas y, en este sentido, el superelemento Z = 110, por quedar situado debajo del tulio (Z = 69), tendría propiedades que, en principio, serían semejantes a las de este elemento. El estado de oxidación más estable es 3^+ para ambos elementos. Probablemente, el actinio guardaría la misma relación con los elementos siguientes, torio, protactinio... de la cuarta serie de transición, y con el einstenio, que él lantano con el hafnio, tántalo... de la tercera y con el cesio.



2. NIVELES DE ENERGIA DE LOS ORBITALES ATOMICOS. Se indican el número cuántico principal, n, la capacidad de cada orbital, el número máximo de electrones para cada valor de n (capa) y el correspondiente elemento que posee todos los orbitales completos. Se advierte la disminución progresiva de la diferencia de energías a medida que aumenta n. Los valores de dichas energías son el resultado de cálculos mecánico-cuánticos e interpretación de los espectros atómicos de los elementos en estado gaseoso. Ambos métodos tropiezan con serias dificultades para los elementos más pesados. Con todo, se ha venido aceptando que los orbitales 4f (n = 8) y 5f (n = 7) corresponden, respectivamente, a las series de los lantánidos y actínidos. A esta última pertenecen los siguientes elementos: torio, protactinio, uranio, neptunio, plutonio, americio, cesio, berkelio, californio, einsteinio, fermio, mendeleio, nobelio y laurencio. Nótese que el número de electrones que cierran capas coincide con el número de elementos de cada uno de los sucesivos períodos.

se les denominó en un comienzo transuránidos.

A grandes rasgos, llámase fisión nuclear la escisión en dos, de masas equiparables, de un núcleo pesado. Recuérdese que el núcleo es un agregado de nucleones: N neutrones y Z protones; se cumple la igualdad $A = N + Z$, donde A simboliza el número másico, que es el entero más próximo a la masa atómica. Por eso, los números másicos del neutrón y del protón valen 1.

Sin entrar en pormenores, señalaremos asimismo que los núcleos fisionables por excelencia son los siguientes: ^{235}U, ^{233}U y ^{239}Pu, donde los exponentes a la izquierda del uranio y del plutonio expresan los números másicos correspondientes a los distintos núcleos; sólo el primero de los tres se encuentra en la naturaleza. Existe una fisión espontánea, tanto más fácil cuanto mayor es su número atómico, y una fisión inducida o artificial. Nos ocuparemos ahora de la segunda.

En los rectores, los procesos de fisión acontecen, de preferencia, en los núcleos de uranio 235. En la fisión de éstos se originan, en promedio, 2,5 neutrones; si tenemos en cuenta que hemos empleado sólo uno, queda un exceso de 1,5 neutrones; de éstos, se necesita otro para la siguiente reacción de fisión, que podrá de ese modo automantenerse, y sobra todavía 0,5 neutrones. Parte de ese exceso se fuga fuera de los límites del sistema, otra se absorbe en materiales de estructura, pensemos en las vainas y refrigerantes del reactor, y lo remanente principalmente en los núcleos de dos isótopos del uranio: ^{238}U y ^{235}U. (Son isótopos los núcleos con idéntico número atómico y distinto número másico, o lo que es lo mismo, con idéntico número de protones y distinto número de neutrones.)

Refiriéndonos al ^{238}U, la absorción de un neutrón, no seguida de fisión, lo que se llama una captura radiativa, origina el isótopo 239 del uranio. Estos núcleos experimentan una bifurcación según dos procesos en competencia: una captura radiativa, en la que se forma ^{240}U, y una desintegración beta, o emisión de un electrón por el núcleo, en la que se crea neptunio 239 con un número atómico de 93. Como estos núcleos experimentan, a su vez, los mismos procesos, se van obteniendo sucesivamente elementos de Z y de A crecientes en cantidades progresivamente menores; por un doble motivo: la masa consumida de ^{238}U se despliega en una abigarrada multitud de isótopos

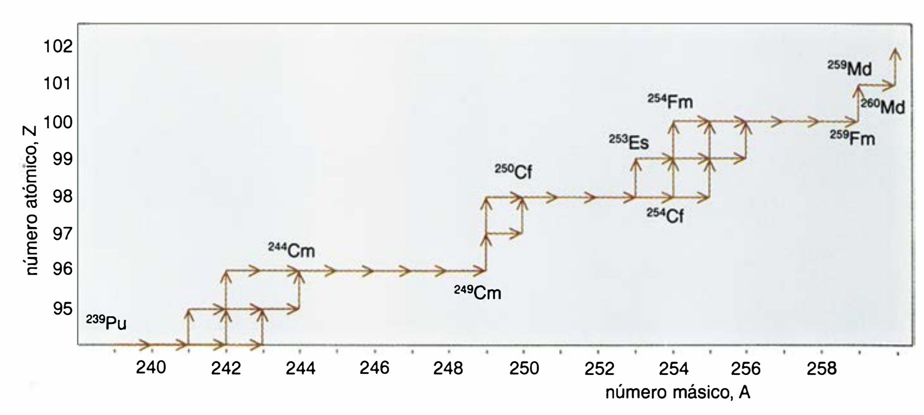
y, además, algunos de ellos se separan parcialmente del sistema en favor de otros procesos, sobre todo fisiones inducidas o espontáneas, siendo las segundas de especial interés para los valores Z más altos.

En un reactor nuclear con flujos neutrónicos del orden de 10^{14}, por cada centímetro cuadrado y segundo, necesitamos tiempos de funcionamiento de un par a tres años para que en el despliegue citado se produzcan cantidades ponderables de los isótopos más pesados. (Entendemos por flujo neutrónico el producto de la concentración de neutrones por la velocidad que llevan.) En particular, para esos reactores de potencia no se sobrepasa el valor de número atómico 98, que corresponde al californio.

Una manera de obviar, al menos en parte, ese inconveniente consiste en irradiar plutonio en reactores de alto flujo, puesto que ello equivale, por un lado, a desplazar el estado inicial correspondiente a $Z = 92$ a otro con número másico 94, y, por otro lado, a aumentar, para el mismo tiempo de irradiación, las cantidades producidas de los diferentes isótopos. El plutonio no constituye ningún factor limitante, puesto que se obtiene en cantidades importantes en el proceso de reelaboración del combustible irradiado.

Existen, además, otros dos métodos para la producción de estos elementos pesados. Uno se basa en las detonaciones nucleares; el otro, en reacciones de elementos pesados con iones acelerados en ciclotrones. Vayamos con el primero.

El mecanismo que describe la formación de esos elementos pesados difiere del que opera en el seno de un reactor nuclear. En las detonaciones nucleares la concentración de neutrones es muchos órdenes de magnitud superior al caso del reactor, circunstancia que posibilita que los núcleos de uranio o plutonio puedan absorber varios neutrones, originándose de este modo isótopos de elevado número másico (A); y éstos, en el breve lapso de tiempo que dura la detonación, no suelen desintegrarse. El uranio 238 puede llegar a capturar, por ejemplo, varios neutrones en un tiempo cortísimo, produciéndose isótopos con un gran exceso de éstos. Dichos isótopos, a partir del final de la detonación (es decir, una vez desaparecidos los neutrones), se desintegran, y lo hacen principalmente por emisión sucesiva de partículas beta. Las detonaciones nucleares subterráneas pueden permitir una mayor producción y recuperación de estos elementos pesados. Las explosiones de supernova vienen a ofrecer un ejemplo paralelo de ese proceso rápido, si bien en ellas los elementos pesados se sintetizan a partir de bismuto.



3. **PRODUCCION DE ELEMENTOS PESADOS mediante la irradiación del plutonio (número atómico 94) con neutrones en un reactor nuclear de alto flujo (10^{15} neutrones por centímetro cuadrado y por segundo). El alcance del proceso es superior al que se consigue en cualquier reactor nuclear de tipo comercial.**

En cuanto a los elementos finales de la tabla periódica, del 101 al 109, nos limitaremos a recordar la parquedad de su obtención; del elemento 109 sólo se ha conseguido un átomo, que se realiza mediante bombardeo de elementos pesados con iones acelerados. Los rendimientos de estas reacciones, de por sí muy pequeños, decrecen a medida que aumenta Z en virtud de la disminución progresiva de los períodos de desintegración (alfa, beta y fisión espontánea).

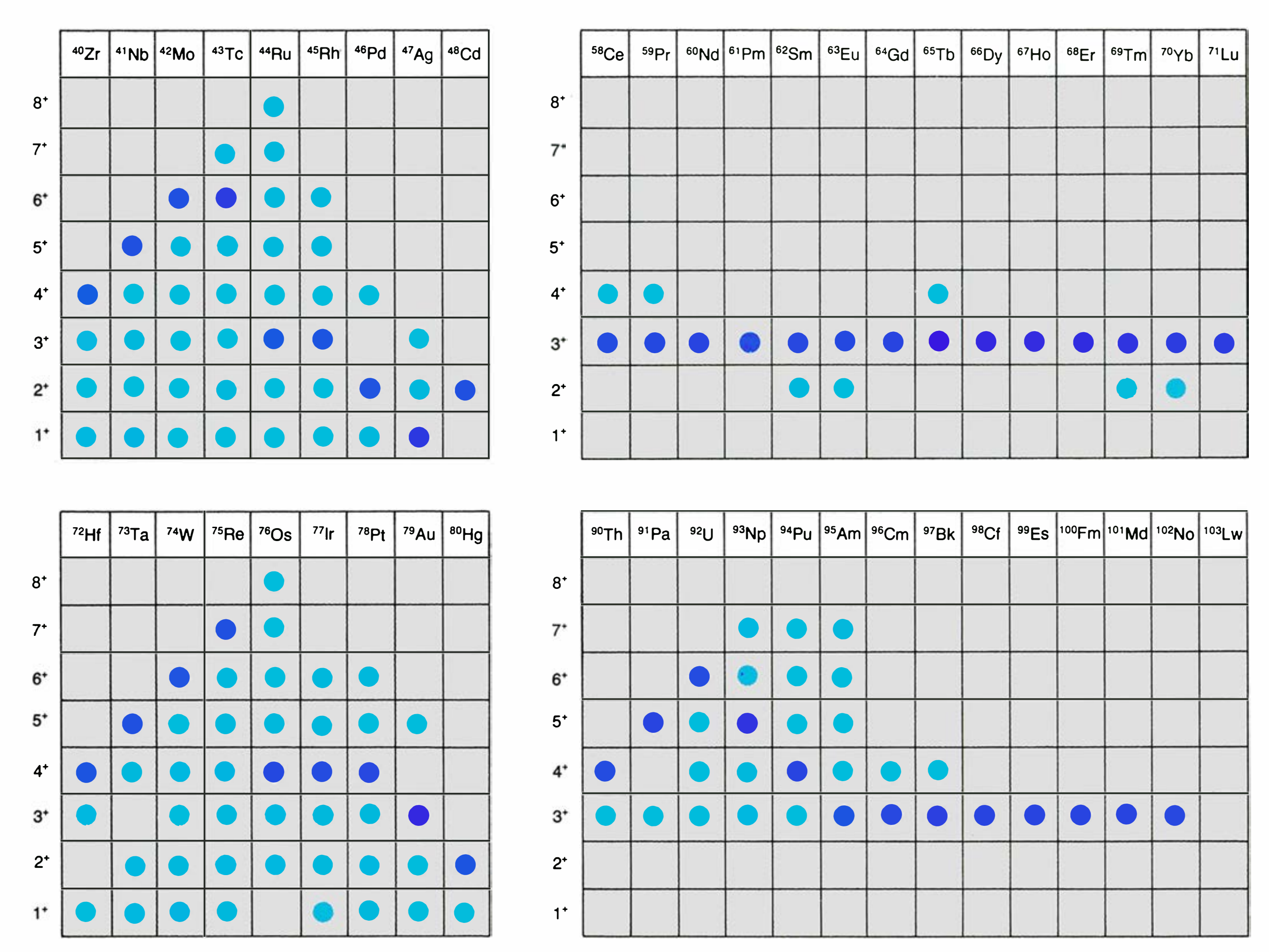
Hasta 1940 los elementos conocidos pertenecientes al séptimo período eran, en orden creciente de números atómicos, los siguientes: francio, identificado ese mismo año, radio, actinio, torio, protactinio y uranio. Los dos primeros encajaban perfectamente en los grupos IA y IIA, respectivamente. Niels Bohr, basándose en los números cuánticos de su teoría del átomo de hidrógeno, ampliada por Arnold Sommerfeld, colocó los elementos siguientes a continuación del radio, lo que equivalía a considerarlos químicamente semejantes a los de la tercera serie de transición, (ET(6)): hafnio, tantalio, volframio, renio, osmio, iridio, platino, oro y mercurio.

El descubrimiento de la fisión nuclear y el desarrollo de sus aplicaciones con el proyecto Manhattan determinó que, a partir de 1940, se identificaran y aislaran otros dos elementos más: el neptunio, con número atómico 93, y el plutonio ($Z = 94$).

Durante algunos años se creyó que el uranio, el neptunio y el plutonio guardaban cierta semejanza. Sugeríase, asimismo, que los elementos todavía no aislados, a saber, los que ocupaban la posición 95 y la 96, formarían con U, Np y Pu una serie que, por estar emparentada y comenzar con el uranio, recibió el nombre de serie de los uránidos. Cuando se pudo comprobar, una vez aislados, que los estados de oxidación de los elementos 95 y 96 diferían notablemente de los anteriores y eran iguales a los de los EL, Glenn Theodore Seaborg, de la Universidad de California en Berkeley, reconsideró la cuestión y estableció una nueva ordenación del séptimo período; se basó, por un lado, en ciertos aspectos químicos y, por otro, en una hipotética ordenación de los niveles energéticos de los correspondientes orbitales cuando el número cuántico n vale 7. Los aspectos químicos se referían al comportamiento similar de los EL y los EA en la elución de una resina que previamente había intercambiado iones trivalentes de los elementos de ambas series.

Los orbitales que intervienen en el sexto período, que se caracteriza por $n = 6$, son, en orden creciente de energías, los siguientes: $6s$, $4f$, $5d$ y $6p$; los $4f$ corresponden a los 14 elementos EL. En 1944 Seaborg estableció la hipótesis según la cual los orbitales para el séptimo período ($n = 7$), en orden creciente de energías, seguían la secuencia $7s$, $5f$, $6d$ y $7p$ que, como puede observarse, es paralela a la anterior.

Así los elementos $4f$, los lantánidos, resultan semejantes a los $5f$, que corresponden a los elementos comprendidos entre el número atómico 90, propio del torio, hasta el 103, que identifica al laurencio; es el conjunto de los EA.



4. LOS ESTADOS DE OXIDACION y su variación con Z para las series representadas. Observando la variación con Z del estado de oxidación más estable (círculos de mayor intensidad de color) se advierte que la serie de los lantánidos discrepa de las otras tres, entre las cuales existe una manifiesta analogía.

La hipótesis de Seaborg tropieza con serias dificultades. En primer lugar, los elementos de la EL presentan una características únicas, que vienen atormentando a los químicos desde Mendeliev. Son, además, características compartidas por todos sus elementos, algo que ni siquiera se da entre los elementos de la serie EA. El torio no se parece al actinio; el uranio no se parece ni al protactinio, situado a su izquierda en la tabla periódica , ni al neptunio, que se halla a su derecha; análogamente, los elementos siguientes al neptunio (plutonio, americio y curio) no guardan ninguna semejanza mutua. Sí hay, en segundo lugar, una semejanza entre los EA y los ET. (EA son, recuérdese, los actínidos y ET, los elementos de transición.)

Al objeto de establecer las semejanzas y las diferencias entre los EL y los EA, por una parte, y entre éstos y los ET, por otra, hemos comparado los correspondientes estados de oxidación, así como las variaciones de otras propiedades con el número atómico. Comenzaremos por los estados de oxidación.

Sabido es que los estados de oxidación de los elementos y su estabilidad relativa, generalmente en medio acuoso, determinan su comportamiento químico. Llama la atención la gran multiplicidad de los estados de oxidación, así como los valores altos de los más estables para una gran proporción de los elementos de las series consideradas, con la notable excepción de la manifestada por los elementos EL; en éstos, descubrimos una multiplicidad muy pequeña y, además, el estado 3^+ es universalmente el más estable.

Las experiencias de elución a las que nos referimos anteriormente se realizaron con iones trivalentes de EL y EA, desde el americio en adelante, excluyéndose los elementos anteriores a éste, es decir, el torio, protactinio, uranio, neptunio y plutonio. Por ello, las regularidades observadas en la elución no autorizan a establecer, sin ambages, que las dos series sean semejantes.

Si estudiamos los valores de una determinada propiedad (simbolicémosla por P) en función del número atómico (Z), observaremos unos diagramas ondulatorios, cuyas olas, una por cada período, poseen una morfología que recuerda el perfil de una parábola, que, como es sabido, constituye una función de segundo grado en la variable independiente, en este caso Z, con tres parámetros. En su expresión formal la función sería: $P = A\,(1 + mZ + nZ^2)$.

Comprobamos que esta función, en comparación con otras ensayadas (lineal, exponencial, logarítmica y potencial), es la que arroja el mejor valor del coeficiente de correlación, r^2. Estos coeficientes son bajos, cifrándose el valor medio para las 12 propiedades estudiadas en 0,64. Resultado que no nos desanimó y, con objeto de tratar de mejorar los valores de r^2, nos pareció adecuado ensayar separadamente las correlaciones para los elementos ER,

por una parte, y para los elementos ET, por otra. Del sexto período consideramos, además, la serie de los EL (4*f*). Para el séptimo período sólo hemos podido estudiar la serie EA, esto es, hasta el número atómico 95 o 96; no disponemos de datos para elementos de otras series de ese período.

Nos encontramos así con un primer resultado: cuando se obtenían las correlaciones para las series en que se clasificaban los períodos, los valores de r^2 mejoraban extraordinariamente, situándose siempre por encima de 0,9; algunas veces se alcanzaron incluso valores próximos a 1. Una mejora tan radical en los valores del coeficiente de correlación no puede ser casual; en principio, cabe atribuirla a las diferencias existentes entre los orbitales correspondientes a cada serie.

Las funciones de correlación son, lo acabamos de decir, parábolas. En cuanto tales, presentan máximos y mínimos, extremos que se encuentran en el elemento que ocupa el lugar central de la serie correspondiente, o en la vecindad del mismo. Por ejemplo, el volumen atómico presenta mínimos y la densidad, máximos. El signo de la concavidad para cualquier propiedad se mantiene para todas las series y todos los períodos, salvo EL. Esta última serie muestra un comportamiento diferente de las demás, que se manifiesta en que las funciones de correlación no presentan extremos; encierra, asimismo, dos elementos discrepantes, el europio y el yterbio; si se prescinde de ellos, los valores del coeficiente de correlación se acercan a la unidad.

¿Qué nos revelan esas funciones de correlación? Primero, no hay semejanza entre las funciones correspondientes a los EL y EA. Segundo, sí existe, por contra, un claro parecido entre las funciones de ET y EA; es decir, nos encontramos con parábolas semejantes. Confesemos de entrada, sin embargo, que para los elementos EA sólo hemos podido disponer de datos fiables en lo concerniente a la temperatura de ebullición, densidad, radio atómico y volumen atómico. La semejanza en la variación de estas propiedades para los elementos ET y EA nos va a permitir situar el elemento final de la serie de los actínidos.

Para nuestra fortuna disponemos de dos propiedades idóneas: la densidad y la temperatura de ebullición. La variación de los valores de ambas propiedades en función del número atómico posee para ambas series una concavidad negativa; dichos valores aumentan con Z hasta alcanzar una cota máxima, desde donde empiezan a disminuir. El hecho de que existan dos funciones cuadráticas diferentes para las series ET y ER debe traducirse en que el valor de la propiedad para el elemento final de la primera debe poderse obtener a partir de la correspondiente función de correlación con un error aceptable, si como es usual el de r^2 es bueno. Si la función de correlación se hubiera obtenido faltando algún dato, puede éste inferirse con suficiente aproximación; en particular, si el dato o datos desconocidos corresponden al elemento o elementos del final de la serie, la extrapolación nunca debe dar valores negativos, ya que éstos carecen de significado.

Aunque conocemos las funciones de correlación para los períodos cuarto y quinto, las que ahora nos interesa considerar son las correspondientes a las series ET(6) y ER(6). En primer lugar, importa el comportamiento de dichas funciones, habida cuenta de que el de las correspondientes del séptimo período debe ser probablemente semejante para la serie EA. Para la serie ET(6), la densidad en función del número atómico se ha obtenido a partir de los datos correspondientes a los elementos comprendidos entre el hafnio, de número atómico 72, y el mercurio (Z = = 80), ambos inclusive. Para la serie ER(6), que abarca los elementos del sexto período con exclusión de los de transición y lantánidos, la correspondiente función de densidad se ha obtenido para los elementos *s*: cesio, con $Z = 55$, y bario, con número atómico 56; se ha obtenido también para los elementos *p*: cuyos números atómicos van del 81 al 84, ya que no existen datos para los dos siguientes (85 y 86), que completan la serie.

Sabemos que la serie ET(6) termina en el número atómico 80 y que el elemento siguiente, $Z = 81$, pertenece a la serie ER(6) y es su tercer elemento. ¿Son coherentes con ese hecho las funciones de correlación? Con la variación de la densidad en función del número atómico para ET(6) hemos calculado los valores correspondientes para Z = = 81, 82 y 83. Se puede observar que, cuando el número atómico se cifra en 81, el error relativo experimenta un aumento súbito, del 16 por ciento, que llega a hacerse excesivo para el siguiente número atómico; para $Z = 83$ resulta ya una densidad negativa, algo inadmisible. En cambio, si utilizamos la función de correlación correspondiente

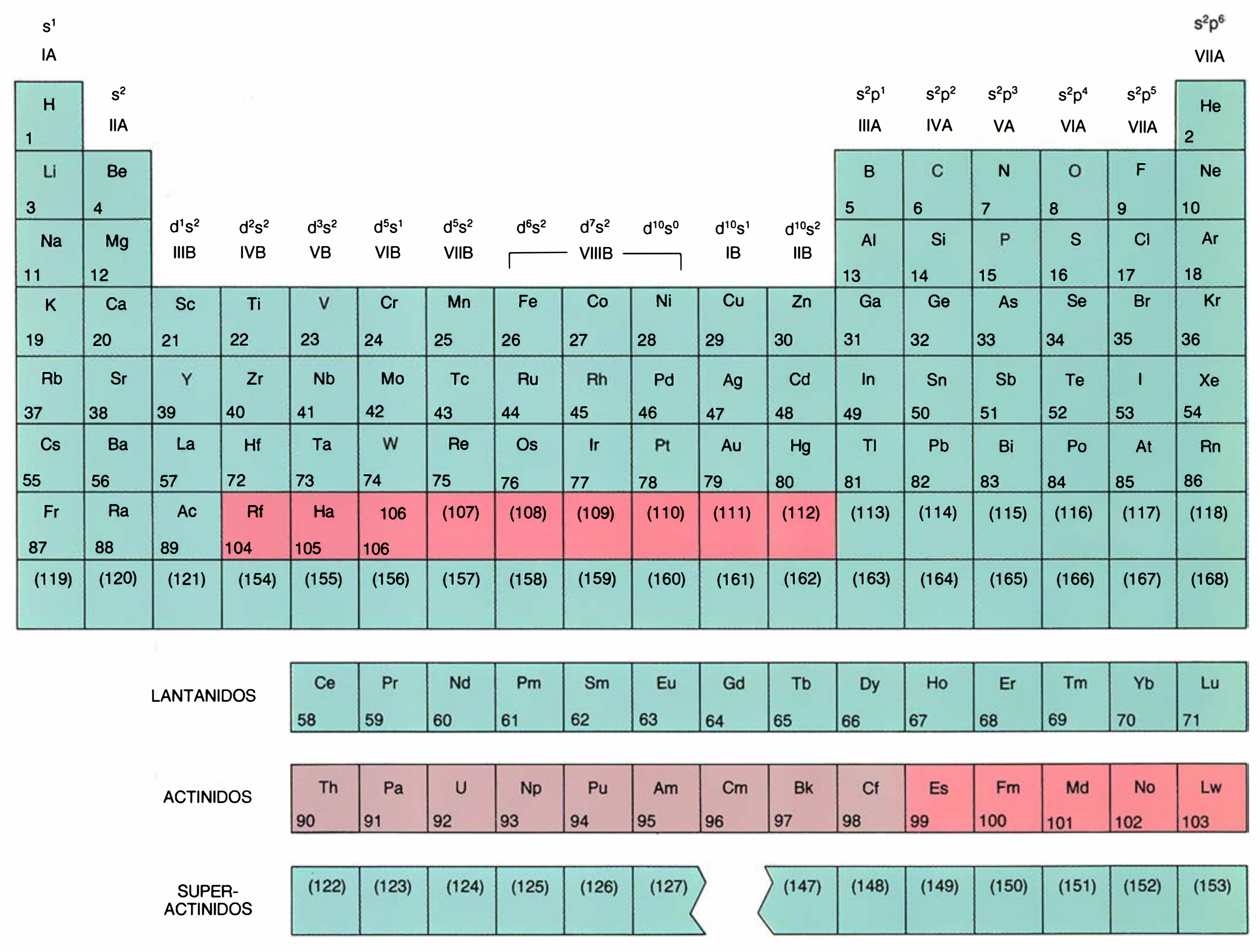
a la serie ER(6) los valores calculados coinciden muy bien con los experimentales; dicho en síntesis: la función adecuada para los números atómicos 81, 82 y 83 no es la ET(6), sino la ER(6). Por consiguiente, las funciones de correlación se muestran coherentes con las diferentes características de los orbitales correspondientes y, por ende, con el hecho de que el número atómico 80 sea el término final de la serie ET(6). Y lo que acabamos de exponer para la densidad, se corrobora en el caso de que la variable escogida fuera la temperatura de ebullición.

Sentado, pues, ese comportamiento para las series ET(6) y ER(6), veamos el de la serie EA. Aquí descubrimos que, para el número atómico 98, el valor de la densidad, extrapolado, resulta negativo, exactamente −0,6; lo que significa que el final de esa serie se ubicaría probablemente en $Z = 97$, que corresponde al berkelio. Ese mismo límite se encuentra para la temperatura de ebullición. Al no conocerse datos para los elementos siguientes, no nos es permitido recurrir a la función para ER(7). Resumiendo, con las dos propiedades clave estudiadas hemos encontrado que para el número atómico del berkelio finaliza la serie de elementos semejantes a los de la tercera serie de transición, lo que equivale a admitir que, en el californio (número atómico 98), debe iniciarse una serie distinta. Hubiéramos deseado, obviamente, que ese Z fuera término final para así completar los 10 elementos correspondientes a los orbitales 6*d* desde el actinio-torio, primer término de la serie, hasta el californio, que sería el último.

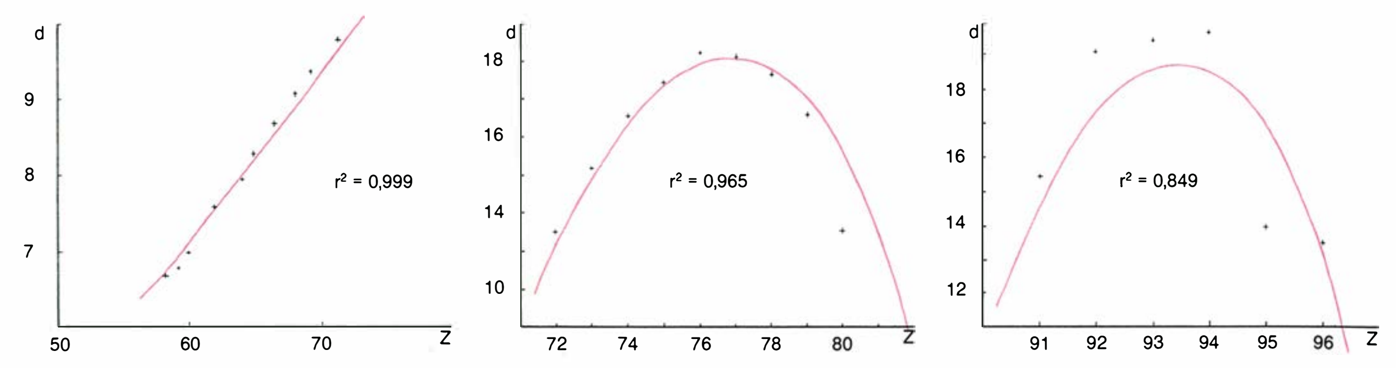
Antes de reconocer esa innovación, podríamos invocar una falta de precisión en el cálculo de los valores de densidad y temperatura de ebullición, lo cual, en todo caso, podría admitirse para la primera, puesto que el valor de coeficiente de correlación que le es propio no resulta muy elevado y bien pudiera ocurrir que el valor de densidad calculado para el californio no fuese negativo. En cambio, para la temperatura de ebullición el valor de r^2 es muy bueno y, para $Z = 98$, resulta una cifra inadmisible. Tenemos, pues, que admitir este inconveniente, aunque conviene señalar que una circunstancia similar aparece para los elementos EL, serie en la que el lutecio, su postrer elemento, podría considerarse el primero de la tercera serie de transición.

A pesar de que los resultados del autor puedan considerarse provisionales, pues sólo se han estudiado cuatro propiedades, la coherencia de los mismos con el comportamiento de los estados de oxidación, que gozan de carácter definitivo, y además son exactos, nos autorizan a establecer una nueva ordenación del séptimo período.

Los actínidos, desde el actinio-torio hasta el berkelio, constituyen una serie semejante a la de los elementos de la



5. TABLA PERIODICA de acuerdo con la hipótesis de Seaborg. El número situado en las proximidades del vértice izquierdo de cada casilla corresponde al número atómico Z. Para los elementos aún no identificados dicho número figura entre paréntesis. Se indica, además, en las cabeceras de los grupos la configuración electrónica de la última capa. Las series de lantánidos, actínidos y superactínidos se han situado fuera de la tabla. Se sobreentiende que las dos primeras series son semejantes en el sentido que lo son entre sí las demás. La variación de las propiedades debiera ser, pues, semejante para ambas series.



6. EJEMPLO DE FUNCIONES DE CORRELACION obtenidas para los lantánidos, tercera serie de transición y actínidos. Se puede observar que en el caso representado (densidad) la variación de esta cantidad con Z es semejante para la tercera serie de transición y actínidos, discrepando de la de los lantánidos.

tercera serie de transición, es decir, los comprendidos entre el Hf y el Hg, ambos inclusive, y, por tanto, a las dos anteriores (los comprendidos respectivamente entre el Sc y el Zn y entre el Y y el Cd). La incertidumbre en torno al inicio de la serie de los actínidos se debe a la falta de datos para el actinio y para todas las propiedades estudiadas. En cuanto al término final, señalábamos que, con objeto de completar los orbitales *d*, se hallaría quizá situado un lugar más allá, en el californio, cuyo número atómico es de 98.

Nótese que, si se admite la existencia de esta cuarta serie de transición, el resto de los elementos del séptimo período debería situarse en los siguientes orbitales disponibles: los *f* y los *p*. Como la energía de los primeros ha de ser bastante inferior a la de los segundos, se ubicarían, al comienzo, los elementos subsiguientes al californio, desde el einsteinio (número atómico 99) al 112, ya que se necesitan 14 electrones para saturar los orbitales 5*f* y, a continuación, en los orbitales *p*, los comprendidos entre el 113 y 118, ambos inclusive. Por consiguiente, los 14 elementos citados deben constituir, en cuanto corresponderían a los orbitales 5*f*, una serie semejante a la de los elementos EL. El autor propone la denominación de einsténidos para esta serie de elementos 5*f*.

Las modificaciones inducidas alteran el orden de los orbitales *d* y *f*, manteniéndose el de los *s* y *p*, por lo que la secuencia de los orbitales para este período, en orden creciente de energías, sería el siguiente: 7*s*, 6*d*, 5*f*, 7*p*. En consecuencia, el francio, el radio (elementos *s*) y los elementos *p*, comprendidos entre el 113 (*eka*—talio, *eka* significa por debajo de) y el 118 (*eka*—radón), ambos inclusive, y que suman ocho en total, ocuparían los mismos lugares en las dos tablas: la tradicional y la renovada por el autor.

Los lantánidos y einsténidos, al poseer, probablemente, configuraciones electrónicas análogas, deben ser elementos con propiedades semejantes. Ahora bien, teniendo en cuenta el carácter aproximado de la ley periódica, ese rasgo no ha de tomarse al pie de la letra. En particular, y por lo que se refiere a los estados de oxidación más estables hasta donde son conocidos, los elementos einsténidos poseen el valor 3^+ para dicha propiedad, lo que indicaría su semejanza con la serie EL. Ello no obstante, las diferencias existentes entre las propiedades, según se adopte una u otra de las ordenaciones para el séptimo grupo, deben ser mucho más acusadas que las motivadas por la naturaleza aproximada de la ley periódica.

Una de las consecuencias más importantes de la nueva ordenación del séptimo período se refiere a la posición en la correspondiente tabla de los superlementos; llamados así en virtud de su exaltada estabilidad ante los procesos de radiactividad, incluido el de la rotura o fisión espontánea, comprenden fundamentalmente los elementos Z=110 y Z=114. La estabilidad que los caracteriza es una consecuencia de la existencia en sus núcleos de capas cerradas de neutrones y protones, o de unos u otros. El número total de cualesquiera de estos constituyentes, o de ambos, es igual a un número mágico; los números mágicos no tienen nada que ver con la cábala, siendo el correlato del número de electrones que cierran capas y corresponden a los gases inertes, cuya estabilidad es bien conocida. Los cálculos mecánico—cuánticos de los números mágicos y de los períodos de desintegración para estos superelementos muestran que el de mayor período corresponde al de número atómico 110 y *N* 184. (*N* simboliza el número de neutrones).

Si, como parecen indicar los modelos de nucleosíntesis, se hubiere sintetizado en las explosiones de supernovas, por un proceso rápido, y en particular en la que originó el sistema solar [véase "¿Desencadenó una supernova la formación del sistema solar?", por David N. Schramm y Robert N. Clayton; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1978], podría haber llegado hasta nosotros, en cuyo caso se encontraría en la naturaleza encerrado en ciertos materiales. La búsqueda de este superelemento se viene llevando a cabo, desde hace unos 20 años, en la Universidad soviética de Dubna y en la norteamericana de California en Berkeley.

El criterio seguido en la selección de esos materiales viene dictado por las características geoquímicas del superelemento, las cuales dependen, a su vez, de su posición en la tabla periódica. Tratándose de un *eka*—platino, dichos materiales deben contener minerales del grupo del platino o próximos a él. A pesar del tenaz esfuerzo realizado, todos los resultados obtenidos hasta ahora han sido negativos, lo cual podría deberse al hecho de que el citado superelemento, caso de hallarse en la naturaleza, se encontraría preferentemente en materiales ricos en minerales de tierras raras pesadas, puesto que, si la tesis del autor fuese correcta, el elemento de número atómico 110 sería un *eka*—tulio, un lantánido pesado de número atómico 69.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LES ELEMENTS TRANSURANIENS ARTIFICIELS. G. T. Seaborg. Dunod; París, 1967.

SUPERHEAVY ELEMENTS. M. A. K. Lubbock. Universidad de Texas en Austin, 1978.

LA MAGNA LEY. I. V. Petrianov y D. N. Trifonov. Mir; Moscú, 1981.

EN EL CAMINO HACIA LOS SUPERELEMENTOS. G. N. Fliorov y A. S. Llinov. Mir; Moscú, 1985.

DE MENDELEIEV A LOS SUPERELEMENTOS. L. Garzón. Universidad de Oviedo, 1985.

Previsión sísmica

Los terremotos no sólo pueden originarse en las fallas que cortan la superficie, sino también en las fallas ciegas que subyacen en un suelo plegado

Ross S. Stein y Robert S. Yeats

La erupción volcánica abre una vía evidente para la emisión de magma y ceniza desde el interior de la tierra. Menos obvia es la relación entre una superficie escarpada y la falla activa que la esculpió. La verdad es que sólo ha transcurrido un siglo desde que comenzó a asociarse los terremotos con este tipo de relieve. El terreno de suaves ondulaciones o pliegues parece hablarnos de paz y nada en él sugiere peligros o siniestros. En palabras de Matthew Arnold:

Huyó hacia un país del sur fraterno,
y ahora con semblante apacible
va errando al ritmo de la divina madre natura...
en un repliegue de los Apeninos.

Pero los Apeninos septentrionales de Italia –uno de los numerosos cinturones de plegamiento que ciñen el globo– no están inactivos. Antes bien, esas montañas las van construyendo terremotos que se producen a lo largo de fallas escondidas bajo el paisaje. Seísmos que, a diferencia de sus homónimos más familiares, no rasgan la superficie; los llamaremos terremotos de "plegamiento en superficie" o terremotos "de pliegues". La ciencia ha empezado ya a prestarles atención.

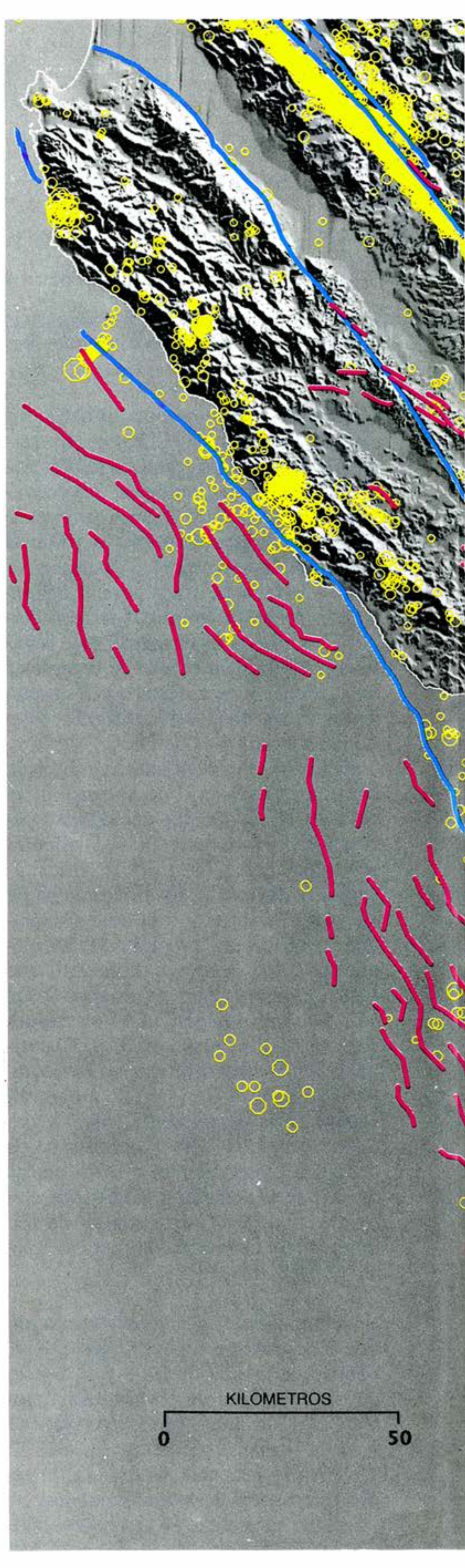
ROSS S. STEIN y ROBERT S. YEATS colaboran en el estudio de los terremotos porque, como apunta Stein, «dos cabezas valen más que ninguna». Yeats enseña geología en la Universidad estatal de Oregon, cuyo departamento dirigió antaño. Tras doctorarse por la de Washington en 1958, entró en la compañía Shell Oil. En 1967 se incorporó a la Universidad de Ohio y en 1977 se fue a Oregon. Stein comenzó su carrera en la Universidad de Brown en 1975 y recibió el doctorado por la de Stanford en 1980. Desde 1981 trabaja de geofísico en el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Dirige el *Journal of Geophysical Research*.

La premisa fundamental en cualquier previsión del riesgo de terremotos se apoya en la observación según la cual la mayoría de esos temblores acontece en fallas activas que, de repente, se quiebran y deslizan. Los grandes episodios se dan a lo largo de ingentes fallas, y éstas, de acuerdo con la opinión común, cortan la superficie terrestre. Los geólogos descubren, en las fallas que han desplazado depósitos superficiales jóvenes, una actividad reciente y las consideran muy propensas a romperse otra vez.

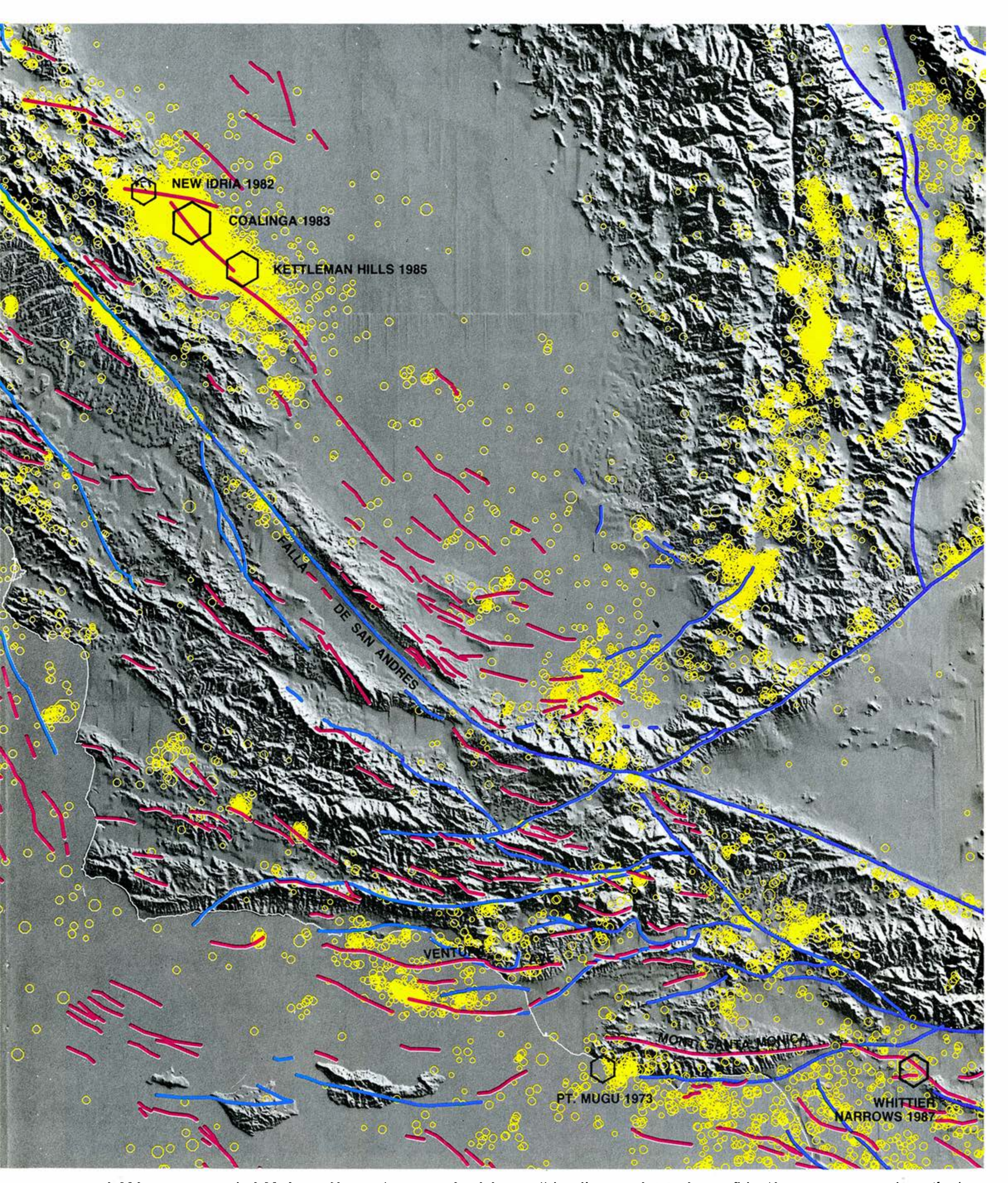
De esa argumentación ha resultado un cuadro minucioso del comportamiento de los terremotos, que ha permitido situar instalaciones críticas –como centrales de energía o pantanos– lejos de fallas activas, identificar emplazamientos de alto potencial sísmico y establecer previsiones probabilísticas sobre la intensidad y frecuencia de los terremotos.

Ni siquiera en California la mayoría de los terremotos pequeños ocurren a lo largo de las fallas que cortan la superficie de la tierra. Medio siglo atrás, se atribuía ello a un número insuficiente de sismómetros. Pero California cuenta hoy con 700 sismómetros en funcionamiento, con una cobertura más completa que cualquier otra zona del globo, si exceptuamos quizá Japón. Cierto es que se registran microterremotos en zonas de fallas activas, como en algunas partes de la de San Andrés. No lo es menos que el mayor número no corresponde a ninguna falla superficial conocida.

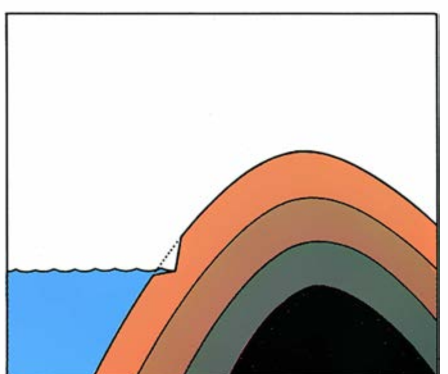
Muchos de los terremotos que no están asociados a fallas de superficie se producen debajo de pliegues; así se llaman las estructuras geológicas que se originan al doblarse hacia arriba los sedimentos estratificados para formar un amplio arco o anticlinal [*véase la figura 2*]. La presencia de un anticlinal refleja una compresión cortical producida al

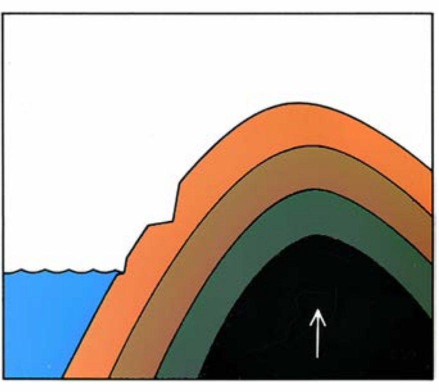


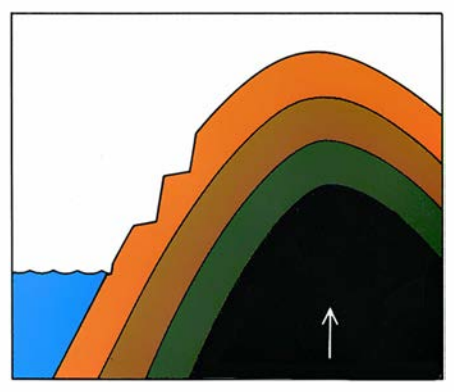
1. TERREMOTOS que se produjeron entre 1980 y 1986 en el sur de California, registrados en este mapa: los círculos amarillos representan los 23.000 seísmos que alcanzaron valores entre 1,5 y 6,5 en la



escala M de momento-magnitud. Muchos temblores están concentrados a lo largo de fallas de superficie (*líneas azules*), especialmente en la de San Andrés. Otros, en cambio, parecen estar asociados con pliegues (*líneas rojas*). Tal asociación puede explicarse si los pliegues señalan la localización de fallas activas "ciegas" que no alcanzan la superficie. Algunos terremotos recientes (*hexágonos*) que han elevado los pliegues confirman esta hipótesis. En los Estados Unidos no se ha efectuado, hasta el momento, ningún inventario completo de los pliegues activos (Ilustración: J. E. Estrem, R. S. Stein, Jerry P. Eaton, R. M. Batson).







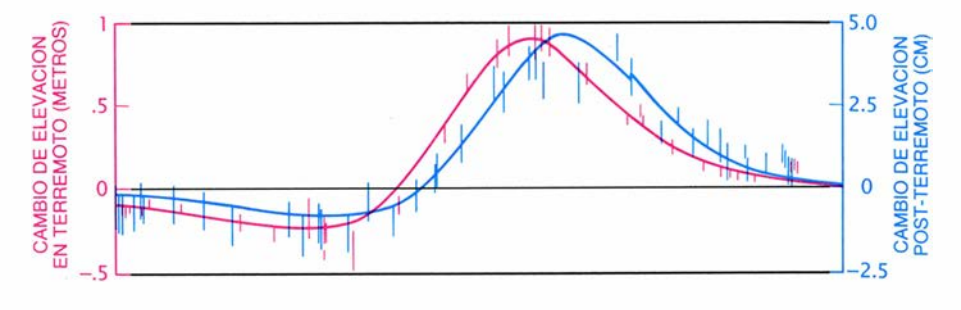
2. ANTICLINAL VENTURA AVENUE, cerca de Ventura, en el estado de California. Se trata de uno de los pliegues, o estructuras geológicas en las que los sedimentos estratificados se han combado hacia arriba hasta formar un arco amplio, que ha experimentado uno de los levantamientos más rápidos del mundo. Los sedimentos combados pueden verse en la fotografía (*arriba*). En los flancos del anticlinal, el oleaje de tormentas ha excavado nueve terrazas. La datación por carbono de las conchas marinas indica que la edad de las terrazas varía entre 1800 y 5600 años. Puesto que el nivel del mar no ha variado de modo apreciable durante ese lapso temporal, la explicación más sencilla es que las terrazas las han levantado temblores que se han ido sucediendo cada 600 años (*abajo*).

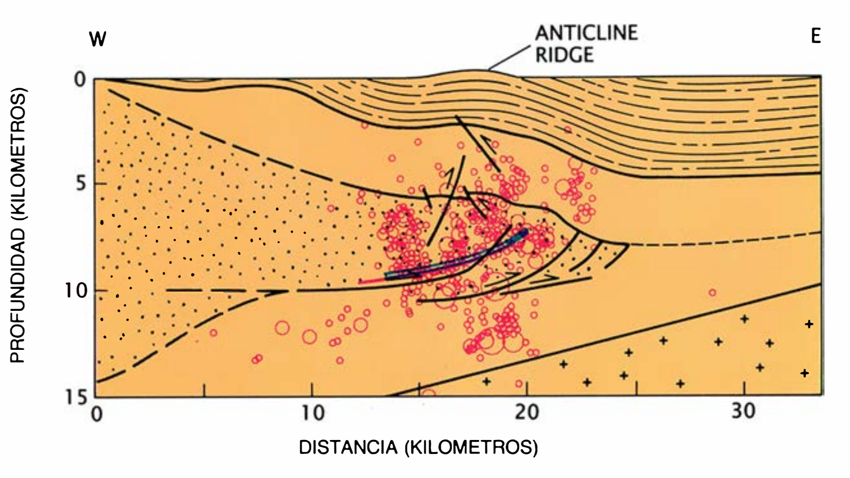
chocar dos placas tectónicas en movimiento, un efecto similar a las arrugas que aparecen en las alfombras cuando las empujamos con el pie. Que tantos terremotos pequeños se generen en fallas ocultas debajo de pliegues reviste no menor sorpresa que interés. Ahora bien, la cuestión principal es la de averiguar si tales pliegues activos ocultan grandes fallas que, a su vez, podrían constituir emplazamientos de seísmos importantes.

Hojeando la historia, vemos que, durante los últimos cincuenta años, se han registrado grandes terremotos de pliegues en Japón, Argentina, Nueva Zelanda, Irán y Pakistán. Dato que, a primera vista, ofrece una respuesta afirmativa a la pregunta. Pero las pruebas de esos episodios, amén de escasas, resultan controvertibles. A pesar de todo, y desde 1980, se han registrado cuatro eventos mayores que han ratificado, sin ambages, la realidad de los terremotos de pliegues. Un quinto suceso podría añadirse muy pronto a esa lista.

Ocurrió el primero en 1980, en el argelino El Asnam. Fue de 7,3 en la escala de momento-magnitud (sucesora de la escala de Richter y simbolizada con la letra **M**), causó 3500 víctimas en tres ciudades norteafricanas y cerró el curso de un río importante. Los terremotos segundo y tercero, el de 1983 en Coalinga (**M** = 6,5) y el adyacente en Kettleman Hills en 1985 (**M** = 6,1), sacudieron zonas de California. Al tratarse de lugares apartados, los seísmos causaron sólo daños menores y una víctima. Había, sin embargo, depósitos importantes de residuos tóxicos; en la pequeña ciudad de Coalinga, el 75 por ciento de los edificios sin reforzar se derrumbó. El episodio siguiente, registrado el 1 de octubre de 1987, sacudió la cuenca californiana de Los Angeles, densamente poblada. Aunque la magnitud de ese temblor de Whittier Narrows (**M** = 6,0) fuese la décima parte del seísmo de Coalinga, los daños se decuplicaron: 350 millones de dólares de pérdidas con 8 muertes. El quinto candidato es el trágico temblor que en 1988 causó en Armenia 25.000 víctimas por lo menos.

La característica más notable de los tres terremotos ocurridos en California es que ninguna de las fallas que se deslizó cortaba la superficie terrestre. En el seísmo argelino, la falla sí la cortaba, pero la cuantía del deslizamiento a nivel del suelo era mucho menor que lo que se deslizó en el foco del terremoto, situado a unos diez kilómetros de profundidad. De acuerdo con estas observaciones, en los terremotos de pliegues el deslizamiento disminuye desde el nivel del terremoto hacia el nivel del suelo; por esa razón, el resquebrajamiento de la superficie, si llega a producirse, es muy pequeño.





3. TERREMOTO DE COALINGA en 1983 de M = 6,5. Provocó la sorpresa de los científicos en California al no estar asociado con ninguna falla de superficie. La deformación del pliegue superior (representada en función de la distancia a un origen arbitrario) se muestra según las líneas verticales rojas en el diagrama de arriba. La línea roja simboliza la deformación producida en un modelo de falla ciega que se muestra en el recuadro inferior. También se ofrece en azul (*recuadro superior*) la deformación habida en los cuatro primeros años subsiguientes al terremoto. La deformación en curso indica que la falla continúa propagándose en el núcleo del pliegue, como muestra la curva azul del recuadro inferior. Los perfiles sísmicos revelan la existencia de muchas fallas en profundidad en esa región del anticlinal (*segmentos más cortos, recuadro inferior*). La repartición muy dispersa de las réplicas (*círculos*) que siguieron al terremoto principal de 1983 (*círculo mayor*) puede atribuirse a pequeños desplazamientos a lo largo de esas fallas. Tal distribución contrasta con la de un terremoto de falla de superficie, en donde todas las réplicas se alinean según la falla.

Un segundo rasgo común: los cuatro episodios ocurrieron por debajo de anticlinales jóvenes, cuya edad no rebasa, pues, algunos millones de años. Esta característica y la tercera y más reveladora observación (en todos esos lugares el pliegue se elevó de manera perceptible durante el terremoto) no sólo indican que los anticlinales jóvenes señalan potenciales emplazamientos de terremotos, sino también que los pliegues constituyen el resultado geológico de terremotos sucesivos. Si admitimos como principio general que el deslizamiento de la falla es menor cuanto más nos acercamos a la superficie, los pliegues deberían permitirnos adivinar la historia de las fallas ocultas o "ciegas" en su interior.

La calidad de los datos sismológicos, geológicos y geodésicos –la medición del relieve de la tierra– convierte el suceso de Coalinga en el terremoto de pliegues "ideal", o de libro. Anticline Ridge, un pliegue de 750 metros de altura bautizado de modo tan apropiado por los petroquímicos que descubrieron allí hidrocarburos en 1898, se levantó 75 centímetros durante el terremoto [*véase la figura 3*]. Los sedimentos plegados más jóvenes no han cumplido los dos millones de años, lo que indica que el pliegue empezó a formarse entonces. Si los episodios de la zona de Coalinga producen elevaciones características de 75 centímetros, el Anticline Ridge podrían haberlo creado el millar de terremotos ancestrales de magnitudes entre **M** = 6 y **M** = 7 que se han ido sucediendo cada 1000 o 2000 años.

El episodio de Coalinga difiere también de los terremotos de fallas de superficie en lo concerniente a la distribución de sus réplicas. Habitualmente, las réplicas de los terremotos asociados a fallas de superficie se alinean

a lo largo del mismo plano de la falla. En cambio, la distribución de las réplicas de Coalinga –y de los terremotos de pliegues en general– es mucho más difusa, tanto por encima como por debajo del plano de falla. ¿Qué se nos quiere manifestar con esto?

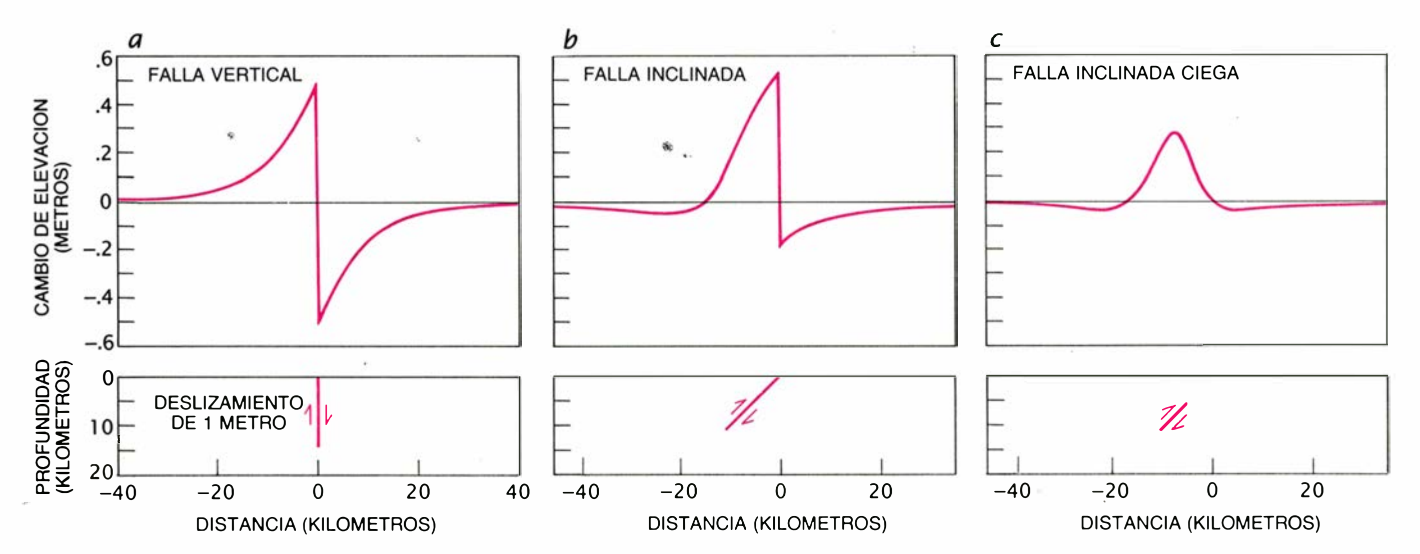
Carl M. Wentworth Jr., del Servicio Geológico de los Estados Unidos, y Mark D. Zoback, de la Universidad de Stanford, han estudiado la estructura geológica profunda de Coalinga recogiendo datos de sondeos petrolíferos, de perfiles de refracción sísmica (basados en los tiempos de recorrido de las ondas sónicas excitadas por una explosión controlada al atravesar la estructura) y de perfiles de reflexión sísmica (basados en el cronometraje de las ondas sónicas generadas mediante vibraciones rítmicas en el suelo y que se reflejan en los estratos internos). Sus resultados sugieren que el núcleo del anticlinal de Coalinga está acribillado de fallas, muchas de las cuales muestran desplazamientos cuya suma constituye una pequeña fracción del desplazamiento a lo largo de la falla principal situada a mayor profundidad.

Todas estas técnicas nos permiten dibujar un panorama en el cual la mayoría de las estructuras son fallas "inversas", o sea, fallas escarpadas a lo largo de las cuales los estratos más jóvenes se ven empujados sobre las capas más antiguas, algo parecido a una alfombra si se le presiona sobre un suelo inclinado. Cuando la falla inversa tiene una inclinación menos abrupta, recibe el nombre de cabalgamiento. En Coalinga, el seísmo principal parece haberse originado en uno de los mayores cabalgamientos ciegos. En cambio, diríase que la mayoría de las réplicas proceden de deslizamientos en las fallas inversas más pequeñas. En ese aspecto contrasta nítidamente con el terremoto de falla de superficie, donde las réplicas suelen producirse a lo largo de un mismo plano. (Podemos verlo en la falla de San Andrés, figura 1.)

¿Cómo se mide el desplazamiento de fallas que yacen ocultas bajo la superficie? Ni la localización ni la cuantía del deslizamiento pueden observarse directamente, pero pueden deducirse de las mediciones en superficie con la ayuda de un modelo elástico sencillo de la corteza terrestre. Se considera la corteza como un sólido elástico que presenta un corte; una suerte de bloque de caucho macizo sajado con una navaja. Cuando una cara del corte tensa la otra, el caucho se estira y su superficie se deforma. En un comienzo se recurrió a este análisis elástico para explicar los defectos, a escala de angstrom, en cristales; luego, se fue generalizando hasta el estudio de fracturas en fallas de 1000 kilómetros de longitud.

Gracias a estos métodos, hemos descubierto que el desplazamiento de falla en Coalinga, cifrado en unos 3,5 metros a la profundidad del terremoto –nueve kilómetros–, disminuía con la altura y daba origen a plegamientos a profundidades menores, para desaparecer al llegar a los seis kilómetros de profundidad. Pasado el terremoto, la falla siguió deslizándose: durante los cuatro años siguientes el pliegue superficial se deformó un 10 por ciento más; el eje del levantamiento se desplazó varios kilómetros hacia el este [*véase la figura 3*]. Según la explicación más sencilla de esa observación, el extremo de la falla se propagaría hacia arriba y hacia el este, llegando al núcleo del anticlinal. La migración de la falla se debe a la tensión provocada por el terremoto, que es máxima en la zona inmediata al extremo de la falla. Los visitantes del Independence Mall en Filadelfia habrán visto el fenómeno: los restauradores de la Liberty Bell tuvieron que perforar un agujero cilíndrico en el extremo de su famosa fisura para que las tensiones se distribuyeran de manera uniforme, evitando así que ese tesoro nacional se partiera en dos.

Establecida, pues, la tendencia a propagarse de los extremos de las fallas, cabría preguntarse por qué la inmensa mayoría de cabalgamientos, como el subyacente al Anticline Ridge de Coalinga, no alcanzan la superficie. A través del análisis de testigos de sondeos petrolíferos, John Suppe, de la Universidad de Princeton, ha identificado pliegues activos en Taiwan que resultan del deslizamiento a lo largo de fallas profundamente enterradas. Ha examinado pliegues antiguos, donde los sedimentos superiores han quedado al descubierto y dejado a plena luz las fallas inferiores. Los estudios revelan que estas fallas se forman a 10 o 20 kilómetros de profundidad y se propagan, lentas, hacia la superficie en el transcurso de millones de años. Así, pues, muchas fallas siguen propagándose, sin duda, hacia la superficie y no han dado aún señales de su presencia. Otras fallas inactivas permanecerán es-



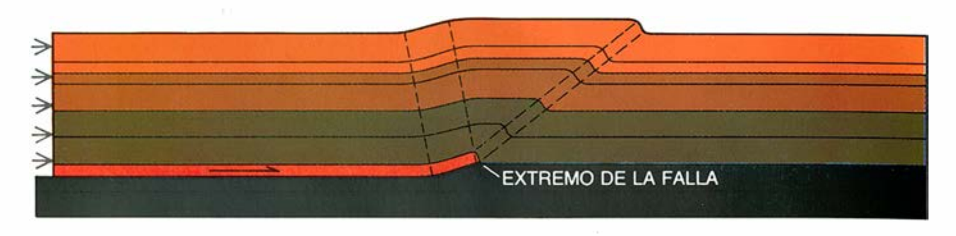
4. MODELO ELASTICO ideado para demostrar de qué modo una falla ciega, que se halla a gran profundidad (*recuadros de abajo*), puede deformar la superficie terrestre (*recuadros de arriba*). Las fallas cortan el interior de la tierra hasta 15 kilómetros de profundidad. La parte izquierda del bloque se mueve un metro hacia arriba con respecto a la parte derecha. Si la falla es vertical (*a*) y alcanza la superficie terrestre, la deformación en superficie es de un metro en el eje de la falla y tiende asintóticamente a cero lejos de la falla. Si ésta se halla inclinada 45 grados (*b*), el desplazamiento total en superficie es sólo del 70 por ciento (coseno de 45 grados). Si la falla no alcanza el nivel del suelo (*c*), recibe el nombre de falla ciega; el deslizamiento ocasiona entonces un pliegue en la superficie.

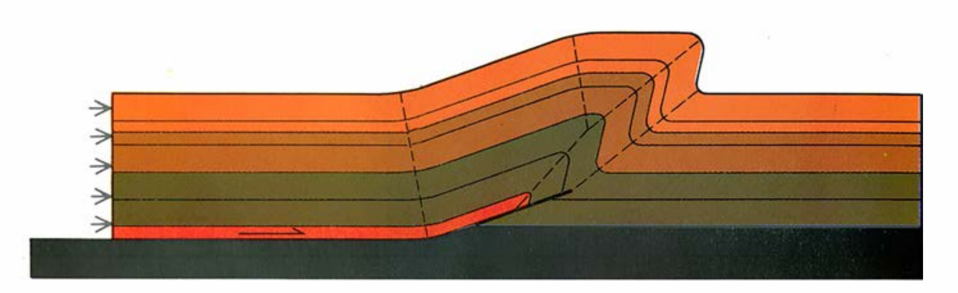
condidas hasta que la erosión de las rocas que las recubren las deje a la vista. Esto contrasta con las fallas más conocidas, en donde "lo que se ve es lo que hay"; estas fallas se propagan rápidamente hacia la superficie o cursan hacia abajo.

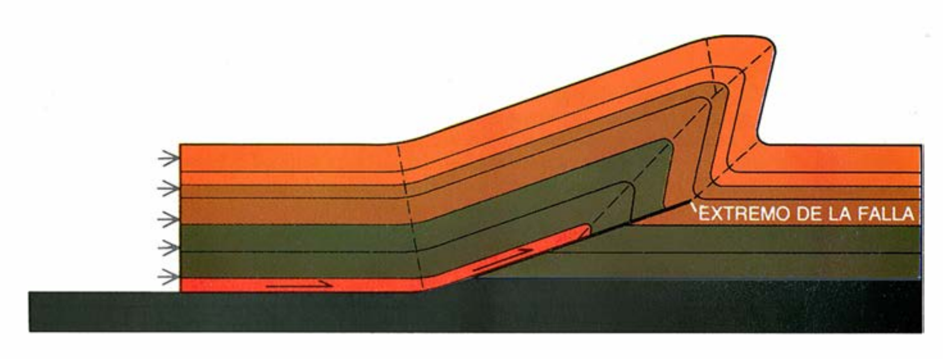
Mediante un modelo del proceso de propagación de fallas, Suppe halló también que, conforme la falla se iba desplazando, avanzaban los pliegues de propagación de fallas; aumentaban éstos de amplitud y cambiaban de forma [*véase la figura 5*]. La deformación posterior al terremoto de Coalinga, ilustrada en la figura 3, facilita una excelente instantánea del proceso imaginado por Suppe: a medida que el extremo de la falla se propaga hacia la derecha, el pliegue cursa a su vez en esa misma dirección.

Un solo episodio de terremoto "de pliegues" no constituye un género. Pero el suceso de Coalinga no fue un caso aislado; de hecho, era el segundo de un trío de seísmos afines que se produjeron a lo largo del mismo cabalgamiento ciego, de los que fue el primero el terremoto de New Idria, al norte, el 25 de octubre de 1982, y el tercero el de Kettleman Hill, al sur, el 4 de agosto de 1985. Los tres terremotos fueron respuestas súbitas ante la compresión noroeste-sudoeste a lo largo de un indudable cabalgamiento, ciego y regional, de unos 100 kilómetros de longitud. El sentido norte-sur que siguen los terremotos nos indica que un deslizamiento de un tramo produce una carga en un tramo adyacente más hacia el sur, que se rompe a continuación. Aunque la mitad meridional de esta serie de anticlinales no haya sufrido ningún terremoto histórico importante, hay que considerarla un posible candidato para una futura sacudida. Debieron producirse terremotos sucesivos a lo largo de la falla ciega para levantar esa larga cadena de pliegues.

El terremoto argelino de El Asnam en 1980 (**M** = 7,3) corrobora esta opinión. El temblor se produjo por un deslizamiento de unos tres a seis metros en una falla inversa, a varios kilómetros de profundidad. Sólo en el segmento central de la falla, la mayor parte del deslizamiento (dos metros) alcanzó la superficie. Geoffrey C. P. King, ahora en el Servicio Geológico de los Estados Unidos, Claudio Vita-Finzi, del University College londinense, y J. C. Ruegg junto con sus colegas, del Instituto de Física del Globo de París, mostraron que un anticlinal asociado a la falla se había levantado cinco metros







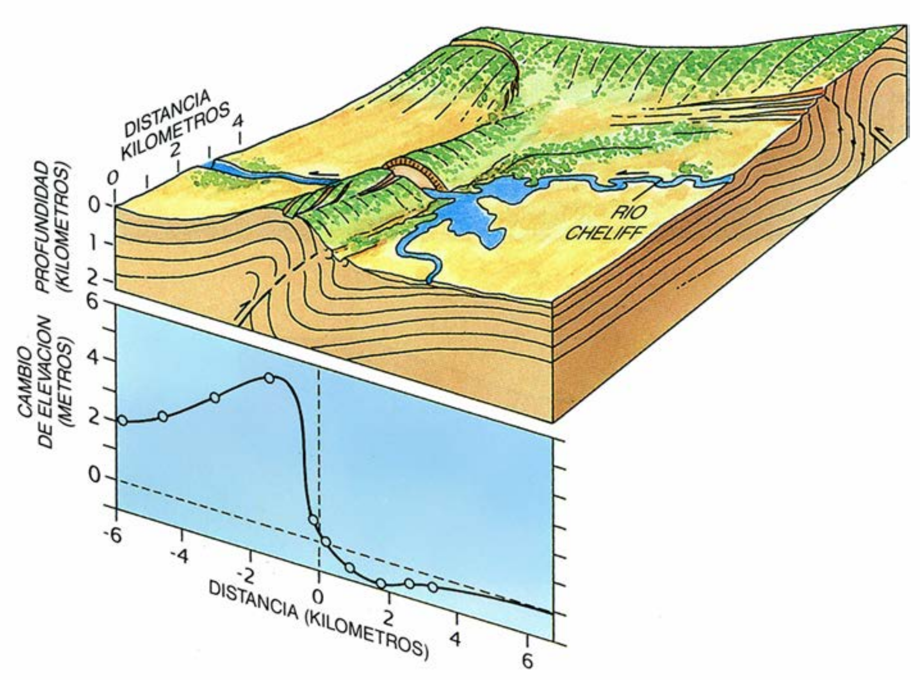
5. PLIEGUE DE PROPAGACION DE UNA FALLA según el modelo diseñado por el profesor John Suppe, de la Universidad de Princeton. La roca se desliza a lo largo de una falla horizontal sobre un sustrato débil y se deforma (*arriba*). La falla se desvía entonces hacia arriba y se propaga por los estratos superiores (*centro*). El desplazamiento continuo de la roca a lo largo de la falla promueve el crecimiento del pliegue hacia arriba y hace que se ensanche y cambie de forma (*abajo*). Este proceso puede estar ocurriendo en el pliegue de Coalinga (*véase la figura 3*). No se han tenido en cuenta diversos efectos que influyen también en la geometría de los pliegues, como la flotabilidad y elasticidad de la corteza, la sedimentación y la erosión.

durante el terremoto y que el valle adyacente se hundió un metro [*véase la figura 6*]. A raíz de ello, se represó el río Cheliff, que corría por la garganta excavada a través del anticlinal en crecimiento. Días después del terremoto, el Cheliff se había convertido en un lago.

Antes de que el río se abriera camino a través del pliegue, se acumularon 40 centímetros de aluvión en el lago, dejando una señal permanente en el registro geológico. Mustapha Meghraoui, de la Universidad de París, excavó con sus colegas los depósitos subyacentes y encontró que, a lo largo de los últimos 6000 años, se habían sucedido hasta seis lagos de ese tenor, de corta duración; cada uno señalaba el comienzo de una inundación súbita. De acuerdo con la explicación más razonable, esos embalses se debieron a terremotos de pliegues de superficie. Además de proporcionar los datos de un solo terremoto de pliegues, el emplazamiento de El Asnam contiene –y es lo más importante– un archivo de terremotos de pliegues, una prueba más de que los anticlinales se construyen por una serie de episodios discretos.

El Asnam ofrece más pruebas de su historia repetida de temblores. En respuesta al combamiento del pliegue, durante el terremoto pueden abrirse fallas secundarias, más pequeñas, en lo alto de esos dobleces. Si tal ocurre, los deslizamientos constituyen un registro asequible de los terremotos precedentes, que pueden fecharse aplicando métodos de carbono-14 a los sedimentos circundantes. Tales dataciones fueron efectuadas por Meghraoui y sus colegas en fallas secundarias de la zona de El Asnam, cuyos resultados concuerdan con el registro de los sedimentos del lago.

El terremoto, terrible aunque pequeño, de Whittier Narrows, registrado en 1987 en el área metropolitana de Los Angeles cierra la lista de que disponemos sobre seísmos de pliegue. Al igual que los temblores anteriores, más importantes, éste parece ser el producto de un desgarrón en una pila de se-



6. TERREMOTO DE EL ASNAM, de magnitud M = 7,3 en 1980. El temblor represó el río Cheliff. El río había excavado una garganta a través del pliegue en el lugar del terremoto, pero durante el seísmo el suelo se elevó cinco metros, cerrando el cauce. En el lago que se creó temporalmente se acumularon aluviones; las excavaciones efectuadas bajo esta nueva capa de aluvión han aportado pruebas de otros seis lagos de corta vida durante los últimos 6000 años. Probablemente han sido el resultado de terremotos "de pliegue" que se han repetido cada milenio. La gráfica muestra el cambio de elevación del suelo a través del pliegue; la similitud entre la curva del levantamiento y la forma del pliegue indica que estos sucesos han creado el doblez.

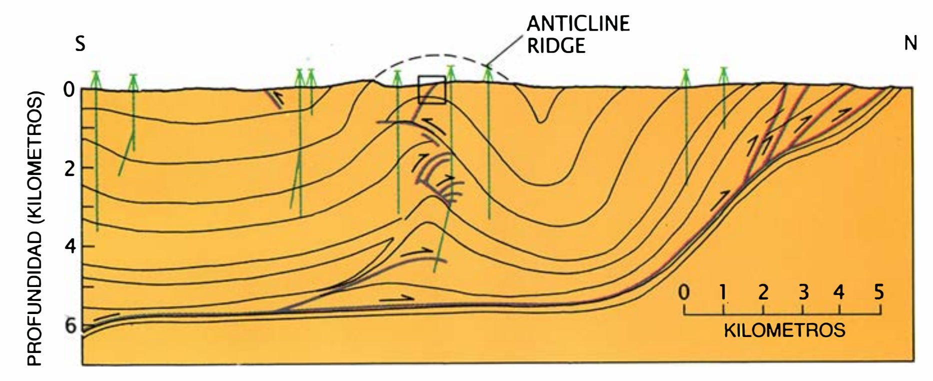
dimentos que estaban comprimiéndose por la prensa geológica que forman dos placas corticales en movimiento. Desplegando gráficamente los estratos combados de la cuenca de Los Angeles, Thomas L. Davis y Jay Namson, de David and Namson Geological Consultants de Los Angeles, sostienen que la cuenca se ha reducido a una velocidad cercana a un centímetro por año durante los últimos 2,2 millones de años; eso representa el 20 por ciento del movimiento total de las placas en el oeste de los Estados Unidos concentrado en una zona de 50 kilómetros de ancho. Ello significa que Los Angeles puede perder 1000 metros cuadrados cada año en plegamientos de superficie, razón presumible de la enigmática y concentrada sismicidad de la cuenca.

Lo mismo que los anteriores, el terremoto de Whittier Narrows levantó su anticlinal correspondiente: el pliegue de las montañas de Santa Mónica. E igual que en los seísmos de New Idria, Coalinga y Kettlema Hills, el de Whittier Narrows parece señalar una extensa falla ciega. La prueba de la alineación de terremotos entre pequeños y medianos (avanzada por Egill Hauksson, de la Universidad de California meridional, y por Lucile M. Jones, del Servicio Geológico de los Estados Unidos) induce a pensar que el seísmo de Whittier Narrows es uno más de los múltiples terremotos que han ocurrido a lo largo de una falla ciega que se extiende 150 kilómetros por debajo del litoral californiano. El terremoto de Point Mugu, el 21 de febrero de 1973 (**M** = 5,6), se produjo en el extremo occidental de dicha falla y presentó muchos aspectos comunes con los principales terremotos de pliegues: alivió la compresión cortical, levantó las montañas de Santa Mónica 35 milímetros, dejó una zona difusa de réplicas y no mostró ningún deslizamiento de falla en superficie.

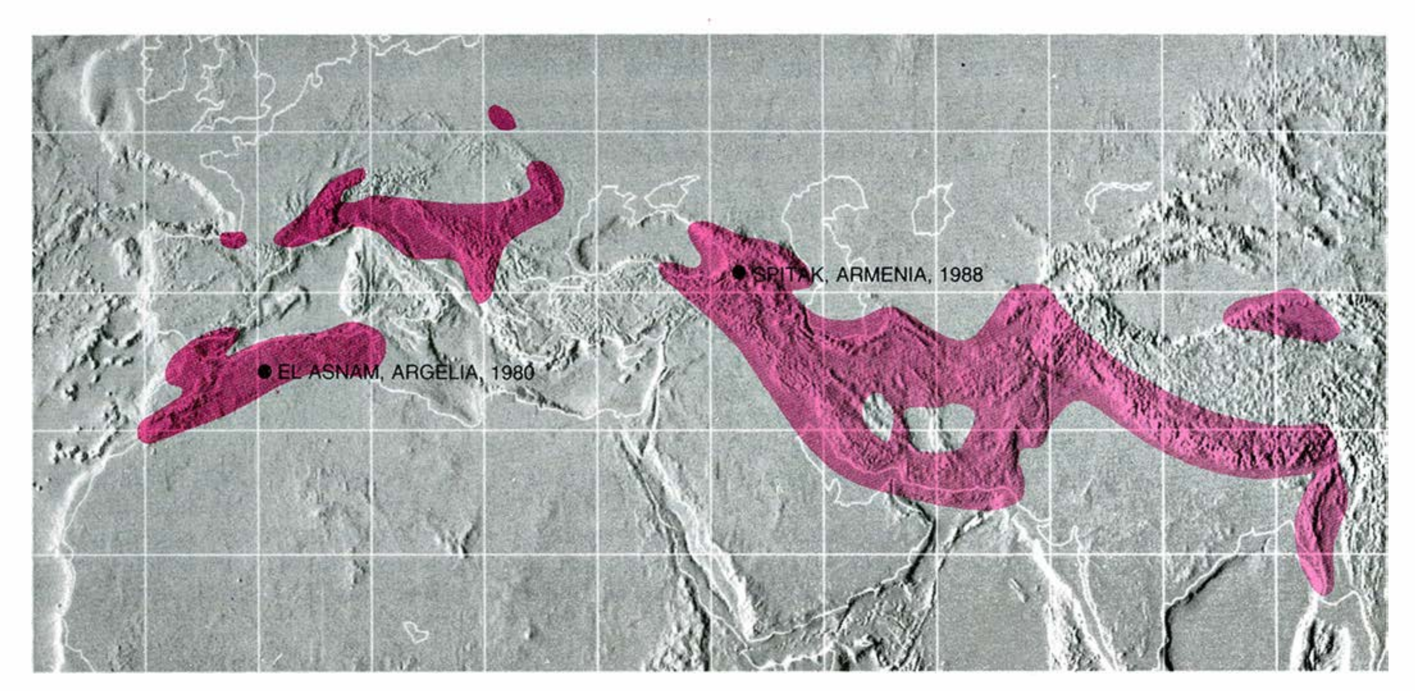
En la exposición precedente, podría dar la impresión de que muchas pruebas aducidas sobre terremotos de pliegue son indirectas: proyección de la deformación de superficie hacia profundidades mayores y examen de la distribución de las réplicas. Sólo cabe obtener testimonios más directos accediendo al interior del anticlinal, acceso permitido únicamente en el sondeo reiterado de un pliegue en busca de petróleo. El anticlinal Ventura Avenue, perforado por más de 1400 pozos que alcanzan profundidades de hasta 6,6 kilómetros, constituye uno de los plegamientos mejor estudiados del mundo –y también de los de más rápido crecimiento–. Se presta, pues, a un estudio detenido.

El anticlinal Ventura Avenue, situado en la costa sur de California, ha levantado antiguos sedimentos marinos, profundos, y dejado al descubierto capas plegadas en los acantilados del litoral. Aunque no se ha registrado ningún terremoto de interés en el anticlinal Ventura Avenue, su estructura y su historia muestran los rasgos de los otros emplazamientos de terremotos ya comentados.

A semejanza de muchos anticlinales, la estructura del Ventura Avenue atrapa petróleo y gas que se desplazan hacia su núcleo. Los testigos de los pozos de petróleo que se han perforado en el anticlinal Ventura Avenue nos permiten obtener un esquema de la sección vertical [*véase la figura 7*]. La curvatura de los estratos es amplia en la superficie, pero se va apretando progresivamente a mayores profundidades. A unos cuatro kilómetros bajo el nivel del suelo, el pliegue muestra un bucle abrupto cuyas rocas subyacentes son débiles en términos mecánicos. Un sondeo de exploración de 6,6 kilómetros de profundidad penetró suficientemente en las rocas más débiles para demostrar que los estratos por debajo del bucle no estaban plegados en absoluto. Ello nos descubre, debajo del pliegue, un cabalgamiento casi horizontal. Unas fallas menores, aguda-



7. UNA FRACTURACION INTENSA invade el núcleo del anticlinal Ventura Avenue. Esta fractura, ocasionada por el combamiento de los estratos, produce muchas fallas (*líneas moradas*). El análisis de los datos de sondeos petrolíferos (*líneas verdes verticales*) efectuados en el anticlinal muestra que el pliegue se aplana a unos seis kilómetros de profundidad. De acuerdo con la explicación más satisfactoria, había una falla casi horizontal, o cabalgamiento, en la base del pliegue. Los movimientos a lo largo de fallas que se bifurcan de esta falla principal hacen que el pliegue se doble y crezca, como ocurre en el modelo ofrecido en la figura 5.



8. CINTURONES DE PLIEGUES ACTIVOS que ciñen la tierra. La mayoría de los cinturones de pliegues, resultado de la compresión cortical al colisionar dos placas tectónicas continentales, forman regiones montañosas muy extensas. Gran parte de la población mundial vive en esas zonas, que comprenden parte de Italia, Yugoslavia, Irán, Afganistán, Pakistán, India, Nepal, Birmania, Japón, Estados Unidos, Perú y Chile. El mapa se ha levantado apoyándose, sobre todo en trabajos anteriores de Albert W. Bally, de la Universidad norteamericana de Rice, y de Hervé Philip, de la Universidad francesa de Montpellier.

mente inclinadas, se suceden desde la base del anticlinal hasta el nivel del suelo.

El anticlinal Ventura parece haberse levantado por deslizamientos sobre el cabalgamiento Barnard, que se bifurca de la falla Sisar, en la base del pliegue. El deslizamiento de las fallas inversas internas parece resultar también del movimiento a lo largo de la falla Barnard. Más hacia el norte, el deslizamiento sobre la falla Barnard supera el de la falla Sisar, lo que provoca que los estratos se aprieten y se inclinen hacia arriba. Este estudio detenido del anticlinal Ventura muestra que no sólo oculta un cabalgamiento principal a la profundidad del mayor deslizamiento, sino que abriga también, en su núcleo, miríadas de fallas inversas más pequeñas. Se trata de rasgos estructurales que guardan una notable coherencia con los deducidos de las imágenes sísmicas y de las medidas geodésicas en los pliegues de Coalinga y Kettleman.

La estructura interna del anticlinal Ventura Avenue sirve para explicar varios aspectos comunes de los terremotos de Coalinga, Kettleman Hills, Whittier Narrows y de El Asnam: aunque el deslizamiento mayor ocurre en la falla principal, en la base del pliegue, los deslizamientos sobre las numerosas y pequeñas inversas que se encuentran dispersas por todo el núcleo pueden explicar la difusa distribución de las réplicas, que caracteriza los terremotos de pliegues.

Otra observación del anticlinal Ventura Avenue ayuda a explicar una nueva e interesante peculiaridad de la mayoría de seísmos de pliegues que no hemos mencionado todavía: las fallas se rompen poco a poco. Aunque no todos los terremotos "de pliegues" son lentos, la inmensa mayoría de los seísmos lentos son "de pliegue". Göran Ekström, de la Universidad de Columbia, ha mostrado que la ruptura de Kettleman Hills tardó unas cuatro veces más en producirse (16 segundos) de lo que suele demorarse un terremoto de falla de superficie de idéntica magnitud. John L. Nábelêk, de la Universidad estatal de Oregon, encontró que en el segmento norte del emplazamiento de El Asnam, donde las réplicas eran más dispersas y minúsculas fallas inversas cortaban la superficie, la ruptura sísmica tardó dos veces más de lo normal. En Coalinga, el tiempo de ruptura sísmica fue normal, pero el pliegue continuó creciendo después del terremoto a un ritmo exponencialmente decelerante, resultado del lento y continuo deslizamiento y de la propagación del cabalgamiento ciego.

En el carácter lento de la ruptura podrían intervenir las altas presiones de fluido registradas en las perforaciones de los emplazamientos de Ventura Avenue, New Idria, Coalinga y Kettleman Hills. Robert F. Yerkes, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, ha mostrado que la presión de fluido allí reinante superaba a la presión hidrostática por debajo de los 3 kilómetros. Los pliegues almacenan fluidos, mientras que las fallas de superficie constituyen una fuente de filtraciones. Una alta presión de fluido en las fracturas de la roca reduce la resistencia de fricción de la roca para deslizar, con el incremento consiguiente de la probabilidad de que se produzca una falla o un pliegue. La difusión del fluido de los poros después de la ruptura modifica la resistencia a lo largo de las fallas, reduciendo el deslizamiento en unas fracturas y favoreciéndolo en otras. El resultado es un aumento de los tiempos de ruptura que puede manifestarse en forma de un terremoto lento o prolongado.

En nuestra opinión, los pliegues se construyen –al menos en parte– de una manera discontinua por obra de terremotos repetidos a lo largo de centenares de miles, si no millones, de años, más que por una deformación lenta y constante. El anticlinal Ventura Avenue confirma nuestro criterio.

El anticlinal tiene sólo entre 200.000 y 300.000 años. Durante ese lapso ha venido creciendo a uno de los ritmos más rápidos del mundo. Kenneth R. Lajoie y Andrei M. Sarna-Wojcicki, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, han identificado nueve plataformas marinas en el flanco del anticlinal. De ellas, la más reciente se ha elevado dos metros sobre el nivel del mar; la más antigua, 20 metros. Cada una de estas terrazas fue excavada por las olas de las tempestades de-

sencadenadas en torno al nivel del mar y están cubiertas de conchas. La datación por carbono de las conchas atribuye una edad de 1800 años a la terraza más reciente y de 5600 años a la más antigua. Puesto que sabemos por otras fuentes que el mar no ha variado en más de un metro de su nivel actual en los últimos 7000 años, las terrazas no han podido excavarse durante épocas en las cuales dicho nivel superaba el actual: es el suelo el que se ha ido elevando. La conservación de nueve plataformas distintas da a entender que esa elevación no ha sido gradual, sino violenta. Como en los lagos de El Asnam, la explicación más sencilla supone que tan gigantesca sucesión de peldaños se debe a levantamientos producidos por seísmos sucesivos.

Hemos señalado que los terremotos de El Asnam, Coalinga, Kettleman Hills y Whittier Narrows demuestran claramente que los pliegues crecen durante los grandes terremotos. Por otra parte, el registro prehistórico en El Asnam y Ventura Avenue demuestra igualmente que estos eventos han ido repitiéndose. No obstante, la mayoría de los investigadores en ciencias de la tierra considera los plegamientos prueba de una deformación constante y progresiva que no necesita de los impulsos puntuales de terremotos. La pregunta crucial es la siguiente: ¿constituyen los casos que hemos tratado la excepción a la regla? Dicho de otro modo, ¿es el crecimiento de los pliegues constante y asísmico o bien oculta fallas sísmicas?

Si se formulara la misma pregunta acerca de las fallas activas que cortan la superficie terrestre, la contestación sería que pocas fallas experimentan un deslizamiento continuado, o arrastre gradual; la regla establece que el arrastre gradual es insólito en los 15 kilómetros superficiales de la corteza. Desde luego que existen notables excepciones; entre ellas, el segmento central de 300 kilómetros de longitud de la falla de San Andrés. Sin embargo, a escala mundial, la mayoría de las fallas siguen el comportamiento de parada-deslizamiento que da origen a los terremotos.

En ningún otro lugar cobra la cuestión tanta importancia como en la cuenca de Los Angeles. El pliegue de las montañas de Santa Mónica, de 1,5 kilómetros de altura (que en Whittier



9. ZONA DEL TERREMOTO DE ARMENIA, según cartografía realizada por *Landsat* en 1987, con coloración efectuada después para la Misión Soviética en Washington D. C. El seísmo principal de 1988 (*círculo blanco mayor*) ocurrió cerca de una falla pequeña en superficie (*línea azul gruesa*) próxima a la ciudad de Spitak. Una serie de pliegues (*línea roja*) cartografiados por geólogos soviéticos 25 años antes de que ocurriera el terremoto aparece alineada con la distribución de réplicas (*círculos blancos pequeños*), registradas por un equipo de sismólogos pertenecientes a la Academia Nacional de Ciencias estadounidense

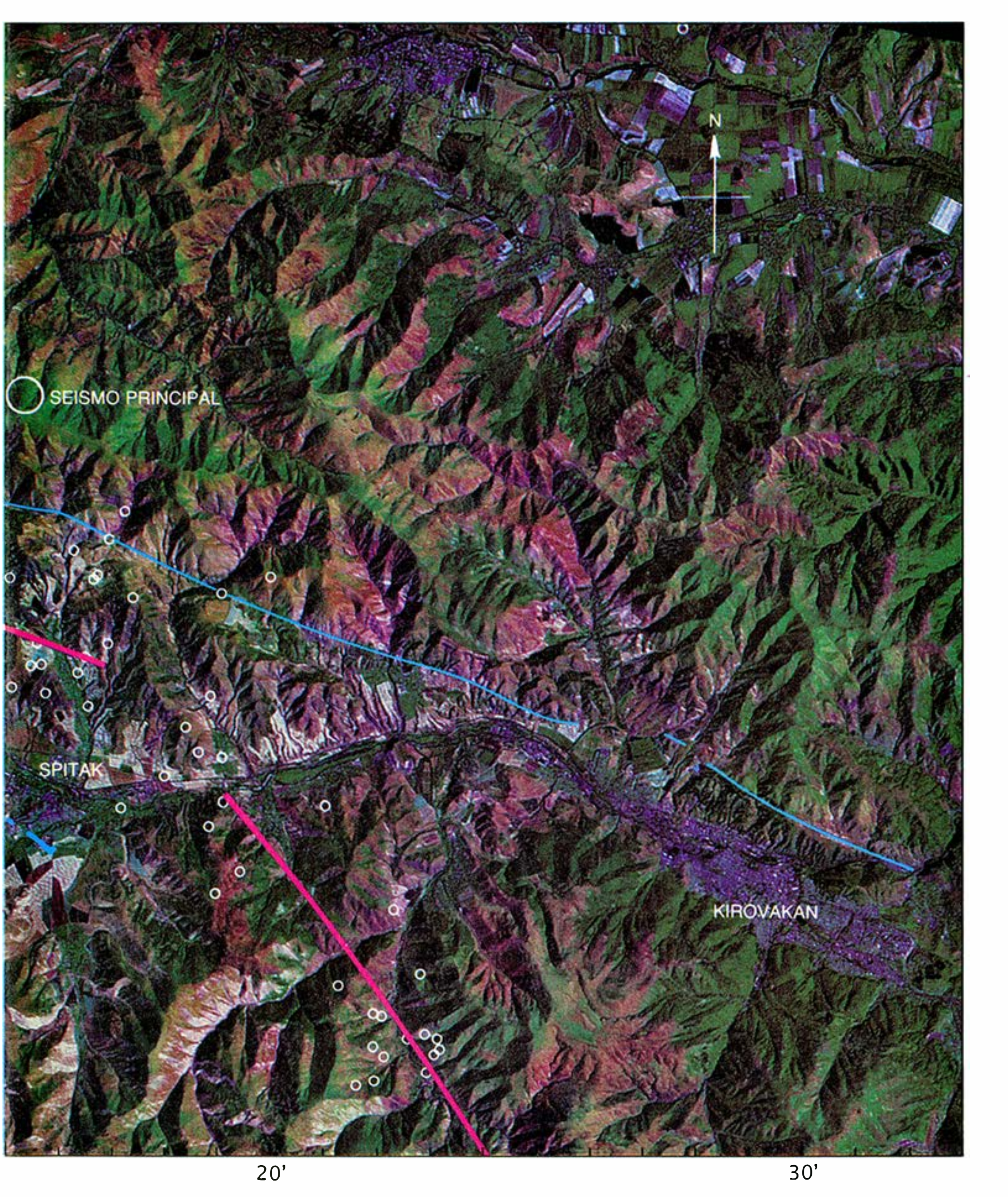
Narrows está casi completamente enterrado por los sedimentos vertidos por los montes de San Gabriel), tiene menos de 3,3 millones de años. El ritmo de crecimiento medio es, por tanto, de 0,5 milímetros por año. Sin embargo, durante el terremoto de Whittier Narrows, el pliegue creció 50 milímetros en la superficie terrestre. Si el crecimiento se debiera, en exclusiva, a los seísmos, podría entonces repetirse un terremoto en ese sitio cada siglo. No obstante, la sección de falla que se deslizó durante el temblor de 1987 era de cinco kilómetros de largo, sólo el 3 por ciento aproximadamente de la longitud total de la falla oculta, que puede tener más de 150 kilómetros. Por consiguiente, si todas las partes de la falla gozaran de la misma probabilidad de deslizarse en un terremoto de **M** = 6, los seísmos deberían sacudir la cuenca de Los Angeles y el litoral adyacente cada tres o cinco años. Eso no ha ocurrido: se ha registrado una media de tan sólo una sacudida de magnitud superior o igual a **M** = 6 cada 25 años en este pasillo, desde la fundación de Los Angeles a principios del siglo XIX.

Una explicación plausible del desacuerdo reside en el carácter constante de gran parte del deslizamiento de la falla y del crecimiento del pliegue: la tensión no se acumula, sino que va liberándose continuamente por arrastre gradual. Los cabalgamientos que se encuentran bajo muchos pliegues se alojan a unos 12 o 15 kilómetros de profundidad, donde la corteza puede alcanzar una temperatura a la cual el cuarzo que compone la roca se vuelve dúctil y facilita el arrastre. Si las fallas experimentan un deslizamiento continuo, los pliegues superiores se deformarán quizá también de manera progresiva. Aunque no existe una prueba directa del crecimiento continuo de un pliegue, se ha simulado en el laboratorio un deslizamiento estable en muestras de rocas; casi la mitad del deslizamiento en el contacto entre las placas tectónicas a lo largo de los límites de placa que rodean el océano Pacífico resulta ser asísmico.

Pensamos que lo más probable es que los pliegues crezcan de manera intermitente durante episodios mayores que el de Whittier Narrows, si bien han de ser mucho menos frecuentes. Los terremotos de magnitud superior a **M** = 7 que se repitan cada varios cientos de años podrían explicar el levantamiento del pliegue, lo que sería coherente con la ausencia de seísmos menores en el corto registro histórico de la cuenca de Los Angeles.

Incumbe a los sismólogos decidirse por una de las dos interpretaciones opuestas: sus consecuencias difieren tajantemente. Si pueden producirse terremotos mayores que el de 1987 debajo del pliegue de las montañas de Santa Mónica, la mayor amenaza sísmica de Los Angeles no procedería de un posible seísmo de **M** = 8 en la falla de San Andrés, 50 kilómetros al norte, sino de un terremoto menor que se produciría, no obstante, debajo mismo de la ciudad de Los Angeles.

Disponemos de varias técnicas para analizar la cuenca de Los Angeles, así como de otros cinturones activos de plegamiento de todo el mundo. Citaremos los perfiles de reflexión sísmica, las mediciones geodésicas del ritmo actual de contracción y de levantamiento de pliegues, el examen de los testigos de los miles de prospecciones petrolíferas y las investigaciones geológicas para identificar los pliegues de superficie que crecen con la mayor celeridad.



y del Servicio Geológico, que fueron invitados con ese propósito por la Academia de Ciencias de la Unión Soviética. La ruptura moderada en superficie y la estrecha asociación del pliegue y de las réplicas inducen a pensar que el terremoto estaba asociado al pliegue. No se sabe todavía si la falla más importante, que hasta entonces no había sido estudiada (*línea azul delgada*), se deslizó durante el desarrollo del seísmo.

Aunque es en el sur de California donde se han concentrado más esfuerzos para estudiar los terremotos de pliegues en los Estados Unidos, resulta evidente que tales sucesos han sacudido todos los cinturones de pliegues activos del mundo, poniendo en peligro una población mucho mayor [*véase la figura 8*]. Además del norte de Africa, donde se produjo el terremoto de El Asnam, se han registrado seísmos con magnitudes que van desde **M** = 7 a **M** = 7,8 en fallas ciegas de la India septentrional, Nueva Zelanda, Argentina, Canadá y Japón. Chile, Yugosla-

via, Taiwan, Irán y Pakistán pueden también sufrir seísmos catastróficos relacionados con plegamientos.

El ejemplo más reciente –y de los más trágicos– de terremoto de pliegues llamó la atención del mundo entero hace sólo ocho meses. Nos referimos al seísmo de Armenia del 7 de diciembre de 1988 (**M** = 6,8) en Spitak, como resultado del cual murieron al menos 25.000 personas. El terremoto sacudió una de las regiones más intensamente plegadas y sísmicamente más activas del globo, las montañas del Cáucaso Menor de la Unión Soviética. La sacudida principal debióse a un deslizamiento en una falla inversa debajo de un anticlinal joven. Se encontró una ruptura en una falla de superficie, pero se extendía sólo a lo largo de unos 8 o 12 kilómetros, mientras que las réplicas se repartían en una zona de 50 kilómetros de longitud, debajo del pliegue. Esto significa que sólo una pequeña parte del deslizamiento que causó el terremoto alcanzó la superficie. Igual que sucedía con los otros terremotos de pliegues que hemos descrito, la distribución de las réplicas era difusa, no alineada a lo largo del plano de falla, como hubiera sucedido en un terremoto de falla de superficie. Este dato provisional indica que el seísmo de Spitak fue de los "de pliegue".

El tamaño y el carácter destructor del temblor de Armenia no hubiera podido preverse a tenor de su corta falla de superficie, pero el plegamiento proporciona un indicio clave que los sismólogos, en el futuro, no podrán pasar por alto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ACTIVE FOLDING IN THE ALGERIAN EARTHQUAKE OF 10 OCTOBER 1980. G. C. P. King y C. Vita-Finzi en *Nature,* vol. 292, n.° 5818, págs. 22-26; 2 de julio de 1981.

SEISMIC POTENTIAL REVEALED BY SURFACE FOLDING: 1983 COALINGA, CALIFORNIA, EARTHQUAKE. Ross S. Stein y Geoffrey C. P. King en *Science,* vol. 224, n.° 4651, págs. 869-872; 25 de mayo de 1984.

ACTIVE FAULTS RELATED TO FOLDING. Robert S. Yeats en *Active Tectonics.* National Academy Press, 1986.

THE 1987 WHITTIER NARROWS EARTHQUAKE IN THE LOS ANGELES METROPOLITAN AREA, CALIFORNIA. Egill Hauksson, Lucile M. Jones, Thomas L. Davis, L. Katherine Hutton, A. Gerald Brady, Paul A. Reasenberg, Andrew J. Michael, Robert F. Yerkes, Patrick Williams, Glen Reagor, Carl W. Stover, Allison L. Bent, Anthony K. Shakal, Edwin Etheredge, Ronald L. Porcella, Charles G. Bufe, Malcolm J. S. Johnston y Edward Cranswick en *Science,* vol. 239, n.° 4846, págs. 1409-1412; 18 de marzo de 1988.

Una herencia distinta

La metilación del ADN podría constituir uno de los principales mecanismos "epigenéticos". Su función sería la transmisión de los patrones de actividad génica de una generación celular a otra durante las fases de desarrollo

Robin Holliday

El nacimiento de un individuo plenamente formado, con tejidos y órganos funcionalmente distintos, a partir de un espermatozoide y un óvulo, es un acontecimiento que no sólo despierta la admiración de los padres, sino que abre también uno de los mayores interrogantes de la biología.

En parte, la solución de dicho enigma reside en los genes del nuevo embrión, heredados de los padres a través del ADN cromosómico presente en el óvulo y el espermatozoide. La activación o desactivación de los genes (de manera permanente o transitoria) según una secuencia predeterminada modifica la mezcla proteínica de las células recién formadas y, como resultado de ello, la actividad de las mismas. Aunque las primeras células embrionarias tienen ya todo el potencial que les va a permitir formar un organismo complejo, no están todavía especializadas. Es más tarde cuando las células se determinan (quedan comprometidas a seguir cierto camino en el desarrollo); posteriormente, se diferencian y se convierten en las unidades especializadas de los organismos adultos. Las células diferenciadas sintetizan las denominadas proteínas de lujo, las que confieren identidad a los distintos tejidos.

La existencia de un programa de desarrollo no explica por sí sola por qué las células embrionarias tempranas divergen más tarde. Algunos procesos deben actuar sobre el ADN para dirigir la ejecución del programa: seleccionar los genes que deben activarse o desactivarse en cada célula y en cada momento. Si no fuese así, todas las células somáticas (no germinales) del cuerpo, dotadas de los mismos cromosomas, se desarrollarían de idéntica manera. Debe haber algo que controle también la transmisión de los patrones de activación-desactivación de una generación celular a la siguiente. Esta transmisión es decisiva para que las células hijas mantengan o continúen desarrollando el programa de especialización.

Los procesos que controlan la ejecución del programa de desarrollo se denominan epigenéticos. Se sabe muy poco acerca de las complejas reglas epigenéticas que regulan la alteración y herencia de las actividades génicas en las células del embrión, o en las más especializadas células somáticas del organismo adulto. Ello contrasta con el amplio conocimiento que poseemos de la genética clásica, esto es, de la mera transmisión de genes de padres a hijos. No obstante, el joven campo de la epigenética empieza ahora a cosechar algunos progresos.

La mayoría de los investigadores interesados en los estudios sobre el control de la actividad génica durante el desarrollo convendrían en que dicho control debe estar basado en interacciones específicas entre ADN y proteínas. (Después de todo, la unión de proteínas específicas a determinados segmentos de ADN de las regiones reguladoras de los genes parece controlar, de forma general, la expresión génica: la transcripción de un gen en ARN mensajero, mediada por la enzima polimerasa de ARN, y posterior traducción del mensajero en la correspondiente proteína.) Más allá de esto, las discrepancias son notables.

Según un punto de vista, que defiende un tipo de herencia proteínica, las características heredables de una célula vienen determinadas por la formación de unos complejos de ADN y proteínas asociadas. Los defensores de esta hipótesis creen que dichas proteínas intervienen en la opción de los genes que deben activarse e inactivarse durante el desarrollo y, además, que tales complejos ADN-proteínas se mantienen en sucesivas generaciones celulares, esto es, que esas proteínas específicas permanecen íntimamente unidas a ciertas regiones de ADN durante la replicación de los cromosomas y la división celular. No se explica, sin embargo, cómo se puede lograr una compenetración tan duradera.

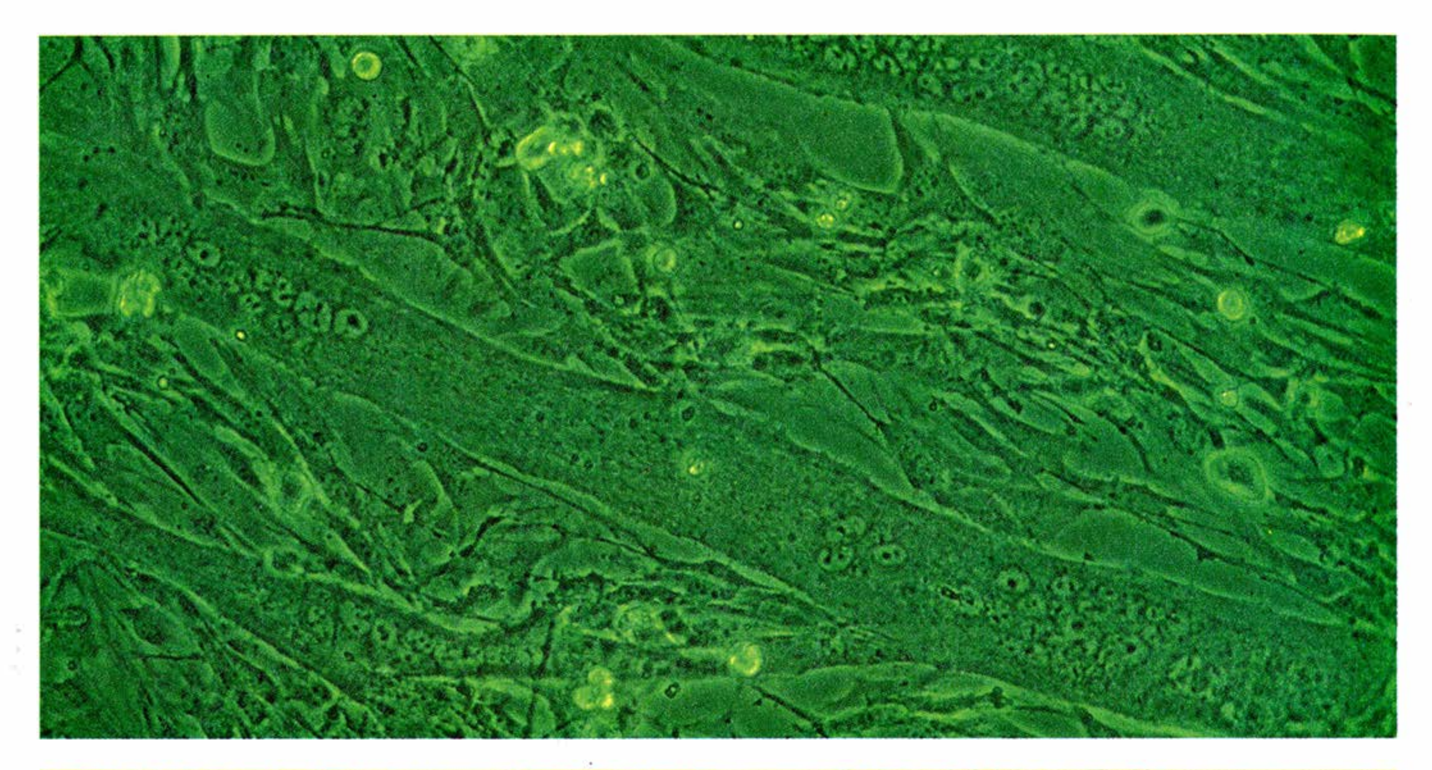
Una posibilidad significativamente distinta es que las propias secuencias genéticas se alterasen de una forma específica y que tales alteraciones persistieran en virtud del mecanismo normal que asegura la fidelidad de la replicación del ADN. Se sabe, por ejemplo, que segmentos de los genes que determinan anticuerpos se reorganizan en el curso de la diferenciación, con lo que se asegura que diferentes células del sistema inmunológico produzcan distintos anticuerpos. Las reorganizaciones son, no obstante, irreversibles; se ha observado, por contra, que los cambios epigenéticos en el ADN de ciertas células somáticas especializadas pueden revertirse o reprogramarse. Por tanto, las reorganizaciones de ADN no han de constituir, probablemente, un mecanismo fundamental en la dirección del desarrollo.

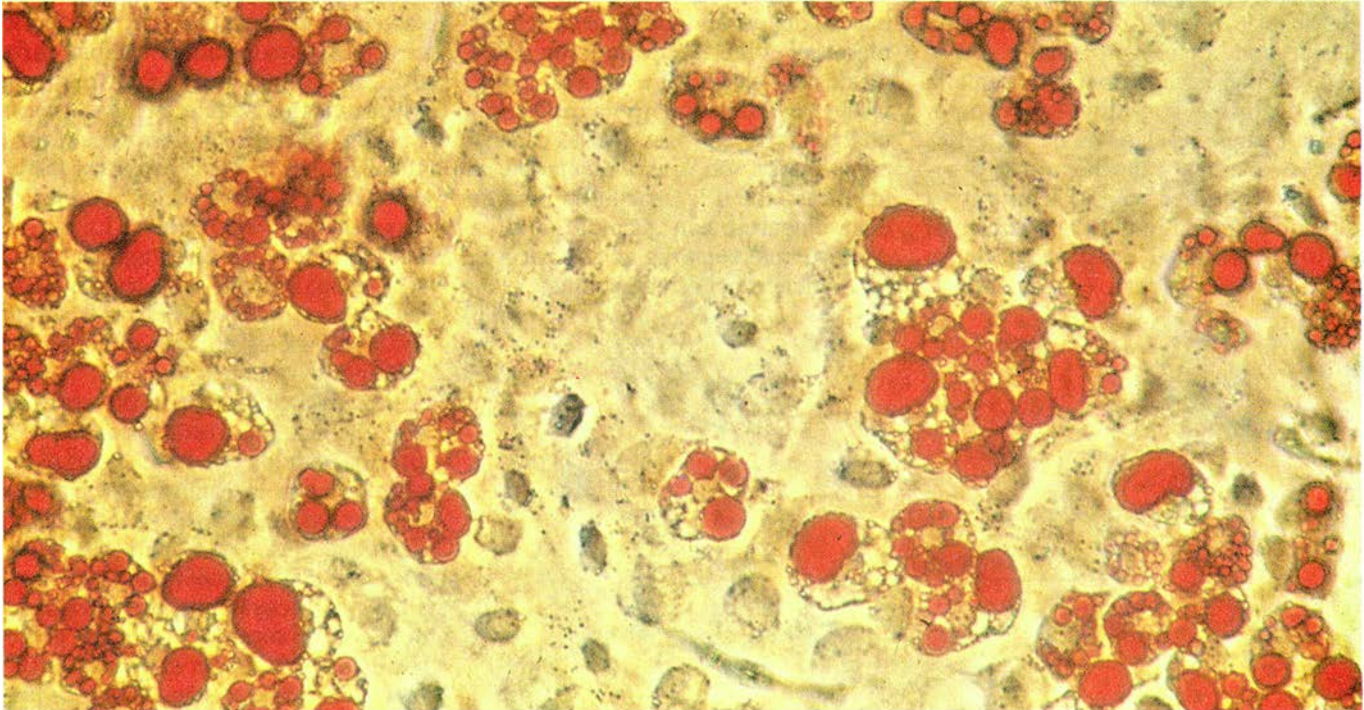
Desde hace cierto tiempo, algunos hemos lanzado una tercera hipótesis, afín, aunque distinta, de la que propone la herencia proteínica. En nuestra opinión, la modificación química del ADN podría constituir un importante proceso epigenético en los organismos superiores. En particular, la adición de un grupo metilo (CH_3) a las citosinas,

ROBIN HOLLIDAY trabaja en el laboratorio de biología molecular CSIRO con sede en la ciudad australiana de Sydney. Tras doctorarse, en 1959, por la Universidad de Cambridge fue contratado por el Instituto John Innes de Hertford, donde desarrolló la teoría de recombinación genética que lleva su nombre. En el Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres, su destino siguiente y cuya jefatura de la división de genética alcanzó en 1970, trabajó sobre recombinación, reparación del ADN y envejecimiento celular. Desde el año 1988 se encuentra en CSIRO, concentrado en el estudio del fenómeno de la metilación del ADN.

una de las cuatro bases nitrogenadas que distinguen a los nucleótidos que conforman el ADN, intervendría en la dirección de los cambios genéticos que se producen en las células durante su desarrollo. (Las restantes bases son guanina, adenina y timina.) La metilación de la citosina parece, como mínimo, hallarse implicada en el control de la herencia de los patrones de actividad génica entre las células. Para nosotros, son los grupos metilo unidos al ADN, y no determinadas proteínas, los que se transmiten intactos de una generación celular a otra. Proponemos también que la presencia o ausencia de grupos metilo actúa de señal para las proteínas reguladoras; lo hacen de tal suerte que las proteínas interaccionan con el ADN de las células hijas de idéntica manera que procedían con el ADN de las células parentales.

Antes de contar con prueba alguna a favor o en contra, fueron varios los mecanismos propuestos para explicar el papel de la metilación en el control del desarrollo. Presentaremos luego las





1. CELULAS ESPECIALIZADAS producidas al tratar un cultivo de fibroblastos (células del tejido conectivo) de ratón con azacitidina, agente que elimina grupos metilo del ADN. La desmetilación va asociada a menudo con la activación de genes silenciados. Normalmente, los fibroblastos no cambian su destino, pero en este caso algunos de los fibroblastos se han transformado en células musculares (*arriba*), que se unen para constituir largas fibras (*bandas*) que se contraen. Otras células se diferencian en adipocitos, células que almacenan grasas (*abajo, teñidas de rojo*). Estos hallazgos apoyan la idea según la cual las alteraciones en el estado de metilación del ADN influyen en la vía de desarrollo que van a seguir las células. Las fotomicrografías fueron suministradas por Shirley M. Taylor, Lesley A. Michalowsky y Peter A. Jones, de la facultad de medicina de la Universidad del Sur de California, con cuyo permiso las publicamos aquí.

pruebas que se han obtenido recientemente y que hablan en favor de la hipótesis; empecemos, sin embargo, por relatar la historia que nos permitirá entender mejor los razonamientos que apoyaban dichas propuestas.

El interés por la metilación de las citosinas del ADN, entendida como mecanismo epigenético de los eucariotas, surgió mientras se investigaban las interacciones entre enzimas y ADN en bacterias, organismos que carecen de organización corporal compleja. A principios de los años setenta, algunos habían observado que las enzimas de restricción, o restrictasas, reconocían de forma específica secuencias breves de bases en el ADN y lo cortaban por esos sitios. Estas enzimas estaban capacitadas para distinguir secuencias con algún tipo de modificación de las secuencias sin modificar; sólo cortaban las no modificadas. Una de las modificaciones más comunes que parecía influir en la actividad restrictasa era la metilación de la adenina y del convencionalmente denominado carbono 5 de la citosina, con la formación de la 5-metilcitosina. Las reacciones de metilación ocurrían inmediatamente después de la replicación del ADN, por enzimas que tenían la misma especificidad de secuencia que las correspondientes restrictasas.

El descubrimiento de que la 5-metilcitosina podía afectar seriamente la interacción entre proteínas y ADN, junto con el hecho conocido de que la 5-metilcitosina constituye un componente común en el ADN de los vertebrados, plantas y muchos otros organismos superiores, sugirió al autor y su alumno John E. Pugh (a la sazón en el Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres), e independientemente a Arthur D. Riggs, del Hospital Nacional de la Ciudad de la Esperanza, en Duarte, California, que la presencia de 5-metilcitosina podría condicionar la actividad génica de los eucariotas. Y, así, participar quizá como una señal que facilitase la activación o la inhibición de los genes. Como se verá después con mayor detalle, contamos ya con un nutrido número de pruebas que demuestran que la metilación de las regiones reguladoras de los genes (o regiones cercanas) se halla, de hecho, generalmente asociada con la inactivación génica, por la probable razón de que la formación de la 5-metilcitosina bloquea la unión de los activadores transcripcionales o estimula la unión de inhibidores.

Pugh y el autor, y también Riggs, propusieron además que la señal de metilación podían retenerla los cromosomas eucariotas durante la replicación, antes de la división mitótica de las células. Todas las células somáticas son diploides; poseen un juego de cromosomas materno y otro paterno. Antes de que la célula se divida, los cromosomas se duplican: las dos cadenas de ADN de cada cromosoma se separan y se sintetizan nuevas cadenas complementarias. Así, cada célula hija recibe un juego cromosómico completo.

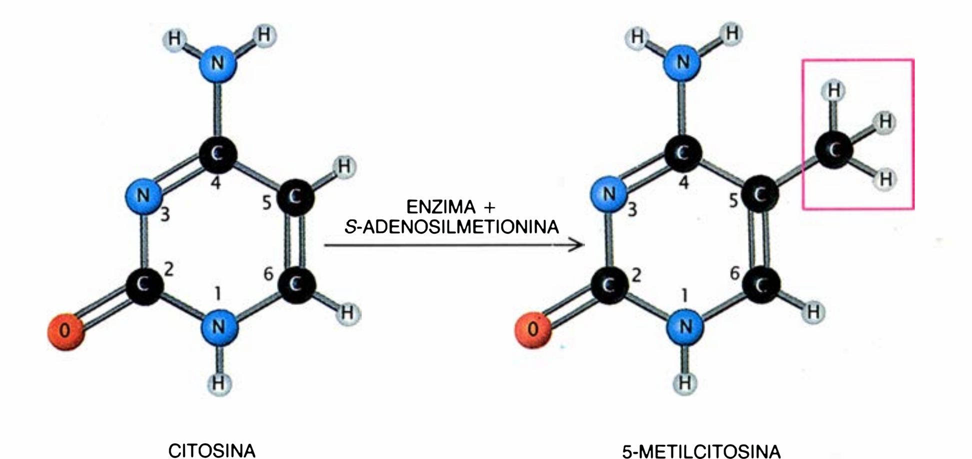
El mecanismo que postulábamos se basaba, en parte, en el conocimiento de que los sitios que suelen metilarse en el ADN eucariota son dobletes de citosina-guanina, esto es, una citosina seguida en la misma cadena por una guanina. Las bases de las cadenas emparejadas son complementarias, no idénticas; como la citosina de una cadena empareja con guanina en la cadena complementaria, la presencia de un doblete de citosina-guanina en una cadena empareja siempre con una unidad de guanina-citosina en la otra cadena. Esta configuración aporta un sustrato (la citosina) para la metilación casi exactamente en el mismo sitio en ambas cadenas.

Aventuramos que una enzima, la metilasa de mantenimiento, actuaría sólo en los fragmentos de ADN "hemimetilados", entendiendo por tales aquellos en que una sola de las dos cadenas tuviese metilado el doblete de citosina-guanina. Al duplicarse el ADN completamente metilado, se originaría ADN hemimetilado, de cuya metilación inmediata se ocuparía la enzima de mantenimiento. Por el contrario, la descendencia del ADN sin metilar estaría también sin metilar, y así permanecería, ya que la metilasa de mantenimiento no podría actuar sobre él. En consecuencia, se conservaría una señal de metilación previa durante la división celular; ocurriría lo propio con la ausencia de metilación, y no habría regiones permanentemente hemimetiladas. Con estas reglas, se recompondría en las células hijas el patrón de metilación (y no metilación) del ADN de una célula parental y, por tanto, su dotación de actividades génico-específicas.

Este guión esquemático del mantenimiento de los patrones de metilación del ADN a través de muchas generaciones de células no explica la manera en que los genes pueden activarse y desactivarse durante el desarrollo; es decir, no explica cómo se cambia el patrón de uniones proteínicas para que ciertas células adquieran una especialización mayor que sus progenitoras. No existe un modelo capaz de justificar, por sí solo, todos los cambios de estado de actividad génica. Lo que no ha sido óbice para que Pugh y el autor sugiriesen algunas vías mediante las cuales la metilación o desmetilación de los cromosomas podrían participar en ese tipo de cambios.

Nuestra primera premisa establecía que sólo una minoría de los dobletes de citosina-guanina del ADN estarían implicados en los mecanismos de cambios de actividad génica; el ADN contiene demasiados dobletes metilados como para que todos cumplan una misión reguladora. Suponíamos también que los dobletes importantes en dichos procesos deberían alojarse en secuencias de bases más largas, reconocibles por proteínas reguladoras específicas para determinados genes; por sí solos, los ubicuos dobletes no conferirían esa especificidad.

Sentadas estas bases, parecía razonable sugerir que los cambios de acti-



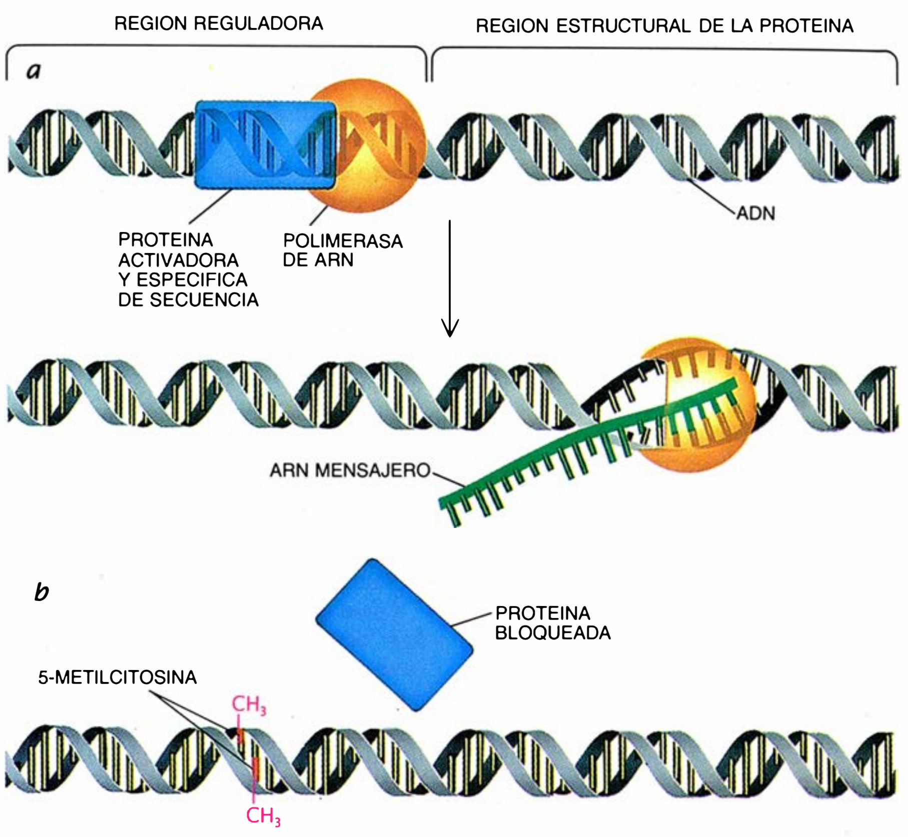
2. CITOSINA, una de las cuatro bases del ADN (*izquierda*). Se metila por una enzima que sustituye el átomo de hidrógeno del carbono número cinco por un grupo metilo (CH_3) de la *S*-adenosilmetionina, para formar 5-metilcitosina (*derecha*). La modificación de la citosina se produce después de la replicación del ADN.

vidad génica se producirían cuando una enzima distinta de la metilasa de mantenimiento reconociese una secuencia específica de bases en una de las cadenas de ADN de un cromosoma y colocase un grupo metilo en un doblete de citosina-guanina de esa secuencia. Esta acción obligaría a la enzima de mantenimiento a metilar, inmediatamente, la cadena complementaria. De esta manera, las futuras generaciones del mismo cromosoma estarían metiladas en el mismo sitio, a pesar de que los grupos metilo no estuvieran unidos al gen en un principio.

En otros casos, una enzima específica de secuencia podría eliminar un grupo metilo de un sitio concreto, antes de que aconteciese la división celular. En ausencia de la señal de metilación, la enzima de mantenimiento no metilaría el sitio opuesto en la cadena complementaria recién sintetizada, y el gen originalmente metilado dejaría entonces de estarlo. Un caso distinto sería el de una proteína específica de secuencia que bloquease la metilación de mantenimiento, uniéndose al punto del segmento de ADN recién replicado donde debería normalmente colocar un grupo metilo (la metilasa de mantenimiento). Cuando ahora se replicase el ADN hemimetilado, la cadena que careciese de grupo metilo originaría otra cadena sin metilar, quedando así eliminada la señal de metilación del cromosoma afectado.

Este singular mecanismo de cambio podría muy bien estar implicado en la segregación de actividades génicas: proceso mediante el cual una célula se divide y origina una célula hija igual a ella y otra que es conminada a seguir cierta ruta de diferenciación [*véase la figura 5*]. La segregación se puede producir en células progenitoras (o madre, "stem cells") ya determinadas de organismos en fase de desarrollo y adultos, por ejemplo, las células de la médula ósea que producen diversos tipos de glóbulos rojos y leucocitos. Estos fenómenos de segregación ocurren también en etapas bastante tempranas del desarrollo; en nuestra opinión, esos cambios de actividad génica podrían asimismo obedecer a cambios de metilación, aunque no necesariamente a los mismos mecanismos que operan en las células madre.

Los grupos de Riggs y del propio autor han abordado la participación de la metilación del ADN en los cambios que, en una fase precoz del desarrollo, determinan la inactivación de uno de los dos cromosomas X en todas las células somáticas de las hembras. (El proceso es aleatorio: en algunas células se inactiva el cromosoma X materno; en otras, el paterno.)



3. COMIENZA LA TRANSCRIPCION de un gen (*a*) cuando una proteína (o proteínas) reconoce una secuencia específica de bases de la región reguladora de dicho gen y se une al ADN. Esta unión es la señal para que una enzima, la polimerasa de ARN, transcriba la región de ADN que determina la proteína en una molécula de ARN mensajero. (Posteriormente, el ARN mensajero se traduce en la proteína correspondiente.) La metilación del ADN (*b*), indicada en rojo, puede inactivar un gen, si impide la unión de la proteína activadora esencial. En opción alternativa, la metilación puede facilitar la unión de una proteína inhibidora.

Hay una región de cambio específica, que recibe el nombre de centro de inactivación, en cada cromosoma X. Esta región interviene en la determinación de la activación o inactivación del cromosoma. En el marco de nuestra hipótesis, esta región podría reconocerla una enzima específica que metila las dos cadenas del centro de inactivación en el cromosoma X que va a permanecer activo, pero no modifica el cromosoma homólogo. Esta modificación diferencial podría ocurrir si se cumplen simultáneamente dos condiciones: que la enzima posea una actividad baja o encuentre dificultades en metilar la región diana y que, tan pronto como la región se metile, la propia metilación desencadene una rápida reacción que imposibilite la modificación del otro cromosoma. De ese modo, uno de los cromosomas quedará metilado en el centro de inactivación, y el otro no. Este patrón se mantendría fielmente en futuras divisiones celulares mediante las reglas de la herencia descritas antes.

Una explicación más detallada de la inactivación de un cromosoma X requiere también un mecanismo que dé cuenta de la progresiva inactivación de todo un cromosoma en una etapa temprana del desarrollo. Ello puede llevarse a cabo si la región de cambio no metilada del cromosoma destinado a quedarse inactivo permitiese la unión de una segunda metilasa que, desde ese sitio, recorriese todo el ADN metilando secuencias de bases específicas.

Aunque hemos hablado de los mecanismos de cambio y heredabilidad como si estuviesen únicamente controlados por factores internos de las células individuales, se sabe que agrupaciones celulares de un embrión sufren cambios coordinados en respuesta a señales extracelulares (inductores y morfógenos) emitidas por otras células. Las señales son recibidas en la membrana celular y transmitidas al núcleo, donde dejan sentir su influencia sobre la transcripción de genes específicos. La metilación podría mediar en este proceso; esto es: la señal recibida en la membrana celular podría alterar el estado de metilación de las secuencias reguladoras de genes particulares en un

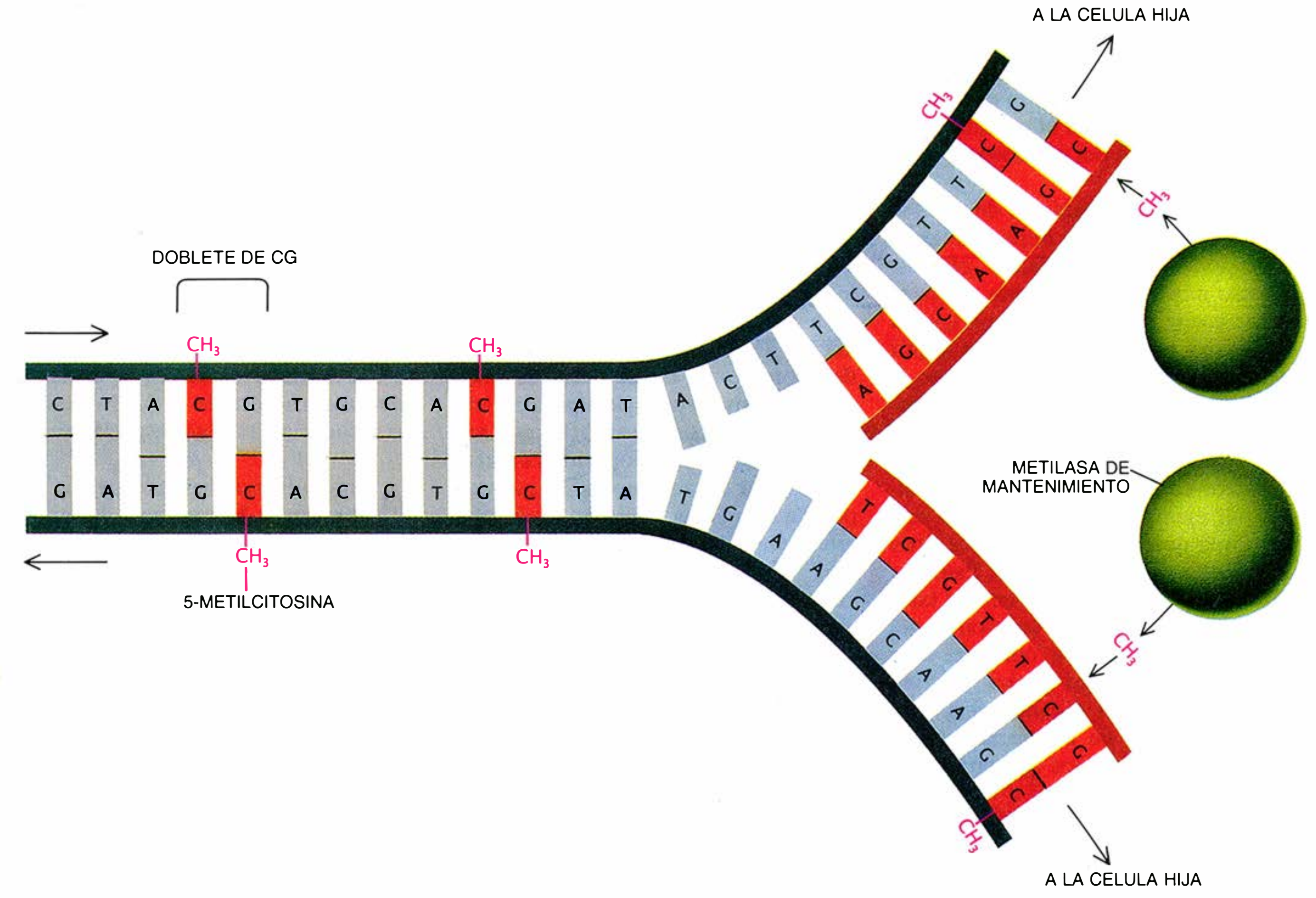
grupo de células diana. Una vez realizado el cambio de metilación, se heredaría por las siguientes generaciones celulares.

Como ya se señaló más arriba, la metilación del ADN podría no ser la única forma de inducir cambios en el ADN heredables. Con todo, a medida que pasa el tiempo, el interés de nuestra afirmación fundamental, que la metilación es un componente de la regulación génica, va ganando apoyo experimental. En muchos estudios, se ha correlacionado la activación génica con la ausencia de metilación del ADN en sitios específicos, normalmente en la región reguladora del gen o en su vecindad. Resulta sorprendente que dicha correlación no constituya un efecto débil o relativo, sino una asociación del tipo todo o nada: la presencia de los grupos metilo no parece estar asociada con un simple descenso de la expresión génica, sino, casi siempre, con la total inactivación. Por contra, las alteraciones en la secuencia de bases de las regiones promotoras, donde se inicia la transcripción, poseen a menudo un efecto modulador, sugiriéndose de nuevo que la señal de metilación es el regulador más específico de la función génica.

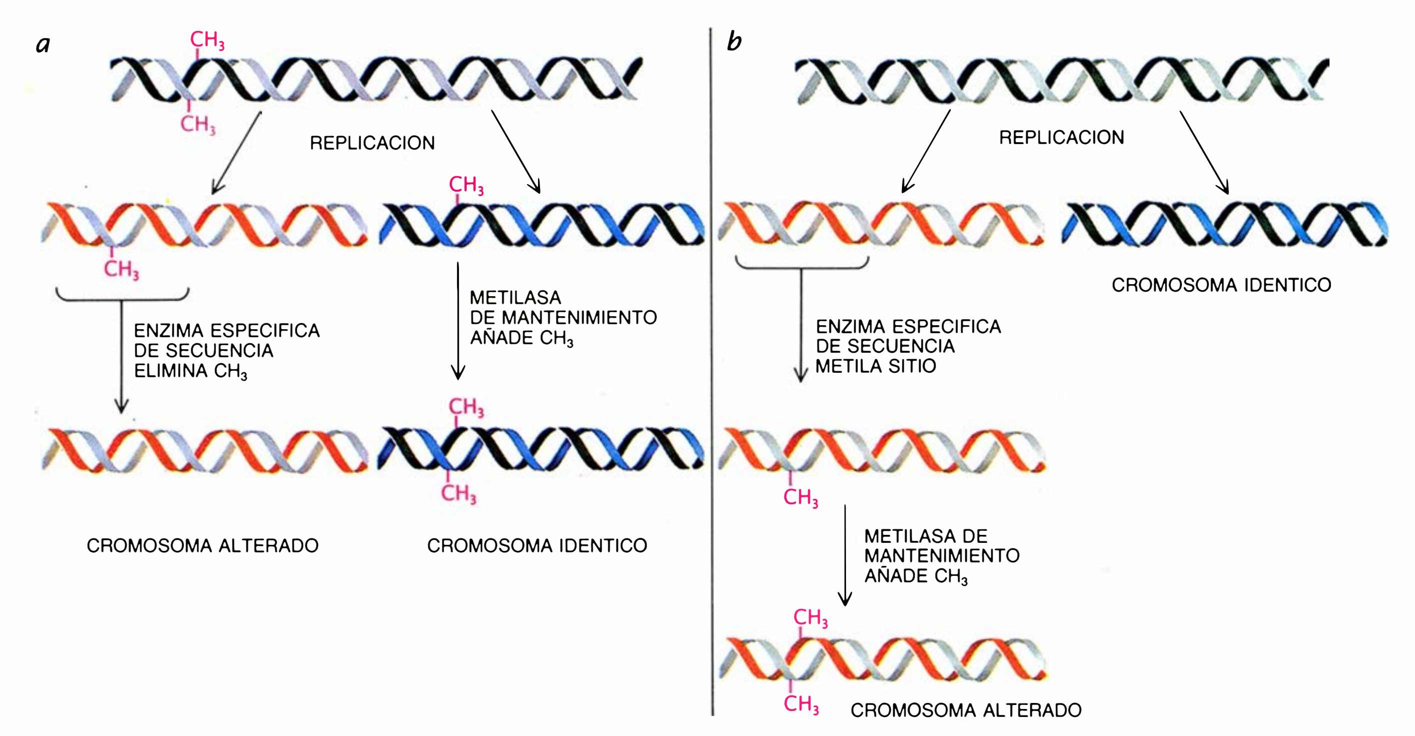
Tales estudios no establecen por sí mismos una relación de causa a efecto entre metilación y actividad génica, pero otros experimentos son más concluyentes. Por ejemplo, cuando se preparan genes metilados y sin metilar mediante la técnica del ADN recombinante, y se introducen en cultivos de células de mamíferos, sólo se expresan los genes sin metilar. [Estos experimentos de transferencia ("transfection") aportan también pruebas sobre la heredabilidad de los patrones de metilación del ADN, ya que el ADN foráneo retiene su estado de metilación muchas generaciones después de su introducción en las células cultivadas.]

Diversos trabajos de transferencia han demostrado posteriormente que, cuando se introduce un gen metilado en una célula que suele expresar dicho gen, el gen insertado se desmetila y activa de inmediato. Esto se observa para el gen de la actina en mioblastos, precursores de células musculares; la actina es necesaria para la contracción muscular. Resulta cierto también en el caso del gen de la insulina en células de origen pancreático y en un gen de anticuerpo en los linfocitos, células del sistema inmunológico. Ahora bien, si se introducen las versiones metiladas de los genes en células sin especializar, permanecen metiladas e inactivas. Estudios similares han demostrado que la expresión, inducida por hormona, del gen de la vitelogenina (un componente de la yema del huevo en anfibios y aves) está asociada con la desmetilación específica de la región reguladora del gen y que el gen de la cristalina (una proteína del cristalino) se desmetila en las células del cristalino antes de su activación.

En todos esos ejemplos, la desmetilación parece darse fuera de los períodos de replicación de ADN, lo que indica de manera tajante que el proceso no es un mero subproducto de la replicación, sino que está activamente controlado por proteínas que sólo funcionan en tipos celulares específicos. La presencia de dicho proceso activo, específico de tejido, sugiere que la desmetilación no es una reacción casual, sino que encierra un propósito definido: la activación génica selectiva.



4. TRANSMISION del patrón de metilación de ADN de una célula a su hija. Del proceso se ocupa una enzima, la metilasa de mantenimiento (*círculos*). El resultado puede ser la transmisión de un patrón idéntico de unión de proteínas y, por tanto, de actividad e inactividad génica. Cuando las cadenas de ADN se separan para la replicación, cada una de ellas retiene sus grupos metilo originales; la metilasa rápidamente coloca nuevos grupos metilo en el sitio opuesto de la cadena recién sintetizada (*naranja*). La enzima actúa sobre dobletes de las bases citosina (*C*) y guanina (*G*). Las otras bases son adenina (*A*) y timina (*T*).



5. CAMBIO GENETICO que permite a una célula precursora dar origen a dos células hijas, una igual a ella y otra con un patrón distinto de actividad génica. El cambio puede realizarse de varias maneras. Por ejemplo, una enzima puede eliminar un grupo metilo de una secuencia específica de bases de un gen recién replicado; ello determinará que el gen se herede en su forma no metilada (*a*). También, la unión específica de una proteína puede impedir la metilación de la nueva cadena (no se muestra). Cabe asimismo que una enzima específica añada un grupo metilo a un gen sin metilar (*b*), que ahora se heredaría de esta forma.

Nuevas pruebas de la influencia de la metilación sobre la actividad génica se han obtenido con un enfoque experimental totalmente diferente: la eliminación química de grupos metilo del ADN. Las células se exponen a una droga, la azacitidina, que se incorpora en el ADN e inhibe la actividad de la metilasa de mantenimiento. En virtud de lo cual, muchos puntos originalmente metilados quedan desmetilados a los pocos ciclos de replicación celular. En muchos sistemas experimentales se ha demostrado que el fármaco reactiva la expresión de genes que se hallaban antes silenciados, lo que sugiere con claridad que la pérdida del grupo metilo es su causa. Así, se metilan genomas retrovíricos inactivos que se han incorporado en cromosomas celulares pero pierden sus grupos metilos y simultáneamente se reactivan en cuanto los exponemos a azacitidina.

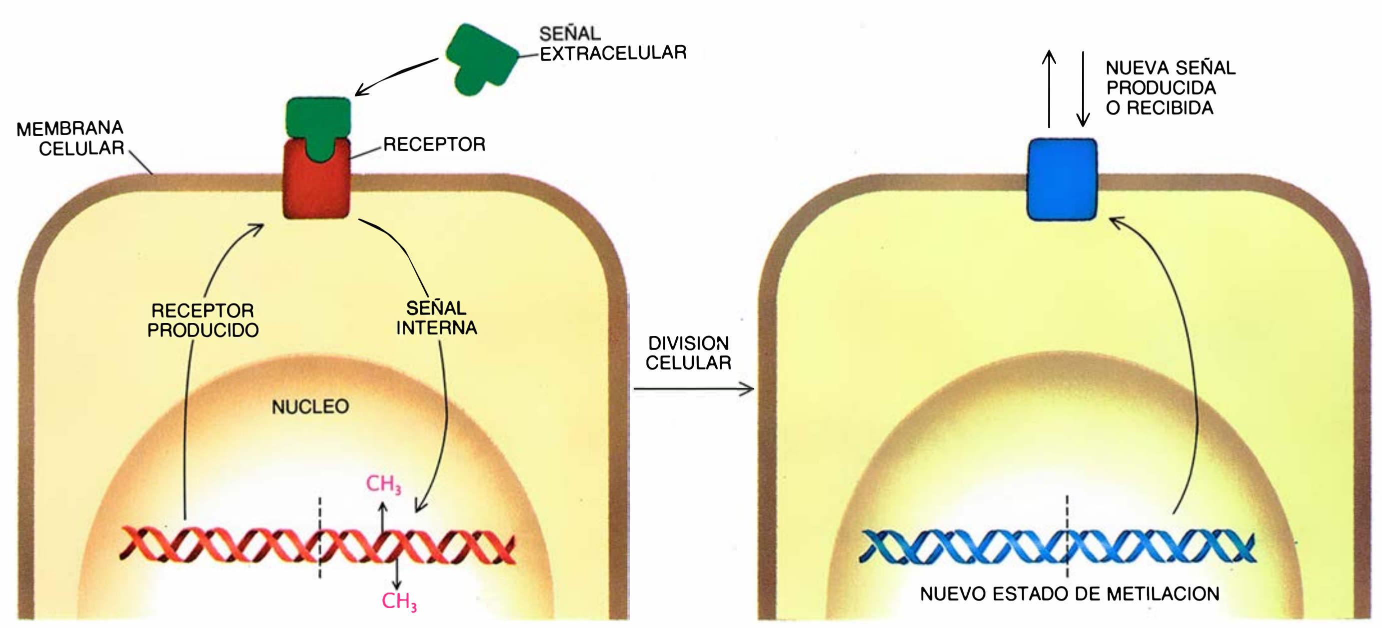
Por citar otro ejemplo, muchas líneas celulares de mamíferos se muestran incapaces de sintetizar una enzima activa porque presentan una mutación clásica, esto es, una alteración en la secuencia de ADN del gen. Otras líneas celulares que son deficientes en esa enzima tienen intactos los genes para dicha enzima, pero se encuentran silenciados, por la presumible causa de su metilación. Cuando las células se tratan con azacitidina, se reactivan del 10 al 30 por ciento de los genes inicialmente silenciados, un efecto que viene a suponer multiplicar por un millón la tasa de reversión espontánea. Estos experimentos demuestran que puede existir un estrecho control epigenético de la actividad génica y que dicho control es heredable.

Aunque el proceso de inactivación y reactivación de genes en células cultivadas de mamíferos ha suministrado pruebas valiosas sobre la existencia de una relación entre metilación del ADN y expresión génica, no demuestra por sí solo que las alteraciones de los patrones de metilación desempeñen un papel fundamental en los cambios de actividad génica durante el desarrollo. Pero contamos con pruebas sugestivas de que los cromosomas X activos e inactivos de las células de las hembras (que, como señalamos, se diferencian durante el desarrollo) poseen patrones de metilación distintos, tal como postulaba el modelo propuesto por Riggs y el autor. En concreto, se ha encontrado que ciertas secuencias de ADN de las regiones reguladoras de los genes "cotidianos", o próximas a ellas, se hallan metiladas en el cromosoma X inactivo y sin metilar en su homólogo activo. Los genes cotidianos, responsables del mantenimiento "diario" de las células, suelen darse activos en todas éstas. Los genes del cromosoma X inactivo pueden también ser reactivados por la azacitidina.

Más directo aún es el trabajo de Peter A. Jones y Shirley M. Taylor, de la facultad de medicina de la Universidad de California en Los Angeles. Observaron la transformación de fibroblastos no totalmente diferenciados, que pueden considerarse células del tejido conectivo, en otros tipos celulares diferenciados, tras el tratamiento con azacitidina. Algunas células se convierten en mioblastos (precursores de las células musculares) y luego en células musculares adultas, que se contraen en las placas de cultivo. Otras células de la población de fibroblastos se diferencian en adipocitos, células que almacenan grasas. Se ha demostrado que la diferenciación de las células musculares iba asociada con la pérdida de metilación en un determinado gen regulador, lo que indicaría que el estado de metilación de los genes influye en las vías de desarrollo de las células.

Si las células somáticas se determinan, diferencian y son capaces de originar sólo ciertos tipos celulares durante el desarrollo, ¿qué es lo que permite a las células germinales permanecer totipotentes, de tal manera que, cuando un espermatozoide fecunda un óvulo, el embrión resultante pueda originar cualquier tipo celular en el nuevo individuo?

Las células germinales no parecen seguir el curso unidireccional de las células somáticas. Cualquier cambio epigenético que ocurra en las células germinales, como la inactivación de un



6. CIERTAS SEÑALES EXTERNAS provocan cambios heredables en las actividades de grupos completos de células durante el desarrollo, modificando quizás el patrón de metilación del ácido desoxirribonucleico. En la transmisión de la señal (*izquierda*) media una proteína difusible (*verde*), que se une a un receptor de la superficie celular (*rojo*) (o bien una proteína que se une a la superficie de otro tipo de célula). El complejo señal-receptor puede provocar un cambio en el estado de metilación del ácido desoxirribonucleico celular, como la eliminación de los grupos metilo de un gen, y producir así un nuevo receptor o un factor difusible que puede influir sobre otras células. El cambio resultaría hereditario y se mantendría, por consiguiente, en las generaciones posteriores (*derecha*).

cromosoma X, revierte o se altera durante o inmediatamente antes de la meiosis, proceso de división celular que origina óvulos y espermatozoides. Además, los cromosomas de óvulos y espermatozoides reciben una impronta distinta, esto es, una marca diferencial, según procedan de la madre o del padre. Así, aunque los cromosomas de un espermatozoide procedan, por ejemplo, de la madre del padre, seguirán llevando la impronta masculina. Se ha comprobado que esta marca diferencial es crucial para el desarrollo normal de los ratones (y, por extrapolación, de otros mamíferos), de lo que se infiere que su función es silenciar y activar series distintas de genes en los cromosomas maternos y paternos, y que tales diferencias se complementan entre sí para dirigir el desarrollo normal.

Por tanto, si se quiere que el desarrollo se inicie y lleve a cabo correctamente, en el ADN normal de óvulos y espermatozoides debe superponerse un "código epigenético". Trabajos recientes indican, sin razón quizá para la sorpresa, que esta reprogramación del genoma durante la meiosis podría implicar cambios en los patrones de metilación: en ratones, los cromosomas que proceden de espermatozoides y óvulos están metilados de forma distinta.

Con independencia del modo en que se controle el desarrollo embrionario en organismos superiores, el resultado final es un organismo completo cuyo cuerpo permanece estable durante bastante tiempo. Con todo, el cuerpo acaba envejeciendo; los tejidos se vuelven torpes. Una causa que probablemente contribuya a ello es la gradual disfunción de los mecanismos de mantenimiento celular: los encargados de reparar el ADN, reemplazar las células que se pierden y regular la transcripción de los genes.

Si la heredabilidad de los patrones de metilación importa para el funcionamiento a largo plazo de los tejidos, entonces la pérdida gradual de grupos metilo contribuiría al envejecimiento. Se pueden producir fallos ocasionales en la metilación de mantenimiento durante la mitosis o en el reemplazamiento de los grupos metilo tras la reparación del ADN de células que no se están dividiendo. De esta manera, la pérdida de metilación podría provocar un estado de activación no deseable en genes silenciados y, por consiguiente, un desarreglo de la función celular y la muerte de las células.

Este planteamiento ayudaría a explicar dos descubrimientos recientes en ratones. En los jóvenes, la frecuencia de reactivación de un gen del cromosoma X inactivo es bastante baja, pero cobra una celeridad progresiva con la edad del animal. Por otro lado, un gen necesario para la formación de pigmentos se silencia cuando se inserta en un cromosoma X inactivo; el resultado es un animal albino. El gen se activa progresivamente a medida que el receptor envejece, con el consiguiente incremento de la pigmentación del pelaje.

Pruebas experimentales con células humanas apoyan este cuadro de la pérdida de metilación. Leonard Hayflick, a la sazón en el Instituto Wistar de Anatomía y Biología de Filadelfia, descubrió que la vida media de las células humanas en cultivo dependía del número de veces que se dividían y no del tiempo cronológico. Se observó en dichas células que el número de sitios metilados en el ADN disminuía al aumentar el número de divisiones celulares y terminaban las células por perder su capacidad de proliferar. La posibilidad de que esta incapacidad multiplicativa, acompasada con la edad, sea, al menos en parte, una consecuencia de la pérdida de metilación nos la sugieren los experimentos acometidos con células cultivadas y tratadas con azacitidina. Un único tratamiento de células jóvenes, suficiente para reducir significativamente el nivel global de metilación del ADN, apenas incide, al principio, en el funcionamiento o tasa de crecimiento de las células. Pero diríase que las células "recuerdan" la exposición al fármaco, pues se extinguen bastante antes que los controles no tratados.

Los trabajos sobre el envejecimiento, aunque no aportan pruebas inconcusas, revelan la fragilidad de los controles epigenéticos sobre la expresión génica: no son absolutos y pueden deteriorarse. Cabe pensar, en ese or-

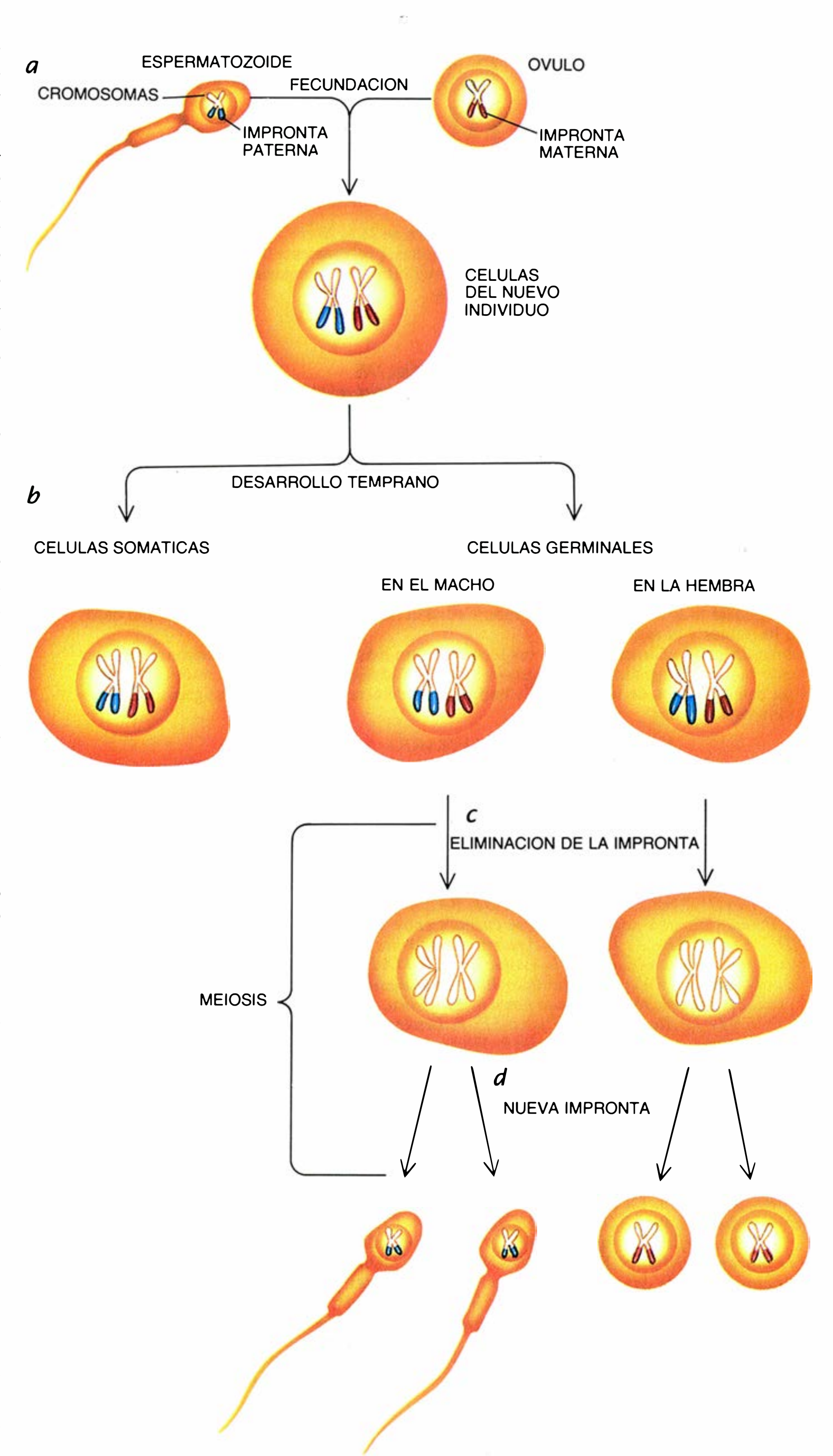
den, que las epimutaciones (aberraciones en la actividad génica) podrían causar la "desdiferenciación" celular y contribuir así a la carcinogénesis.

Entre las razones que se aducen para sugerir la presunta intervención de las epimutaciones en los procesos cancerosos está la siguiente: el descubrimiento según el cual se originan, de células no metastásicas, células metastásicas con mayor frecuencia de lo que cabría esperar si dicho cambio fuera sólo desencadenado por mutaciones genéticas normales. Por otro lado, las tasas de mutación parecen ser similares en el ratón y en el hombre; sin embargo, las células humanas se muestran más remisas a transformarse en cancerosas, ya sea espontáneamente o tras la exposición a mutágenos. Según este descubrimiento, las diferencias en las tasas de transformación podrían deberse a la existencia de controles epigenéticos más potentes en los humanos.

Hasta ahora, no se ha demostrado la implicación directa de los cambios de metilación del ADN en la carcinogénesis. Hay, sin embargo, pruebas indirectas. Así, la azacitidina es un carcinógeno muy vigoroso, que produce un abanico mayor de tumores en animales experimentales que otros carcinógenos conocidos. Ahora bien, la azacitidina no suele producir mutaciones genéticas. Y dado que el compuesto químico afecta a la metilación del ADN, parece razonable sospechar que las alteraciones registradas en los patrones de metilación por azacitidina contribuyen al desarrollo del cáncer.

Tomados, pues, en su conjunto, los datos aducidos convierten la metilación del ADN en un importante factor epigenético del desarrollo de los organismos superiores. Datos que sugieren, asimismo, que los fallos producidos en los procesos normales de metilación intervienen en el envejecimiento celular y en la transformación de las células normales en cancerosas.

El interés potencial de la metilación de las citosinas en los procesos celulares viene subrayado por su presencia en organismos muy dispares, aunque quizá no se trate de un fenómeno universal. Ni en el nemátodo *Caenorhabditis*, ni en la mosca de la fruta *Drosophila*, que pasan por complejos procesos de desarrollo, se ha encontrado 5-metilcitosina en su ADN. Observación en que se apoyan algunos investigadores para negar que la metilación de la citosina desempeñe un papel importante en la ejecución del programa de desarrollo de los eucariotas superiores.



7. LA IMPRONTA característica que identifica el origen paterno (*azul*) o materno (*rojo*) de los cromosomas de un individuo (*a*) puede persistir en las células somáticas durante muchas generaciones celulares (*b*). La impronta, que parece determinar un patrón diferencial de activación e inactivación en los cromosomas de origen paterno o materno, se altera, sin embargo, en las células germinales durante la meiosis. (Las células germinales se segregan en una etapa temprana del desarrollo y después, tras la meiosis, producen óvulos y espermatozoides.) Se elimina la impronta original (*c*) y se sustituye por la que corresponde al sexo del individuo en cuestión (*d*). Así, a los cromosomas del esperma se les confiere una impronta masculina (incluso a los cromosomas que provengan de la madre), y a los del óvulo una impronta femenina. Los experimentos sugieren que la metilación reversible es el mecanismo que insta la marca diferencial de los cromosomas.

Este último punto de vista es coherente. Pero caben otras explicaciones. Quizá *Caenorhabditis* y *Drosophila* sí dependan de la 5-metilcitosina para regular la expresión de sus genes, aunque la cuantía de la misma en su ADN no sea detectable con las técnicas actuales. El tiempo y la investigación nos dirán si los controles epigenéticos sobre el desarrollo en diferentes especies se fundan en los mismos mecanismos moleculares o en otros diferentes.

Cualesquiera que sean los factores decisivos del control del desarrollo de *Caenorhabditis* y *Drosophila*, no se puede rechazar que la metilación del ADN se nos ofrece como un factor epigenético importante en muchos eucariotas. La metilación, sin embargo, no explica todos los procesos del desarrollo. Los controles sobre el comportamiento y características celulares ejercen sus efectos en varios niveles: interacciones entre ADN y proteínas, transducción de señales desde la membrana celular hasta los cromosomas y comunicación intercelular. Necesitamos una teoría amplia y unificadora del desarrollo, si queremos que la epigenética dé cuenta del comportamiento de los genes durante estos procesos con la claridad con que la genética mendeliana describe la transmisión de los genes de generación en generación. Se precisa un marco de ese tipo donde se puedan formular predicciones contrastables y donde se pueda desarrollar ese continuo juego de teorías y experimentos que es esencial para el avance de la ciencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

5-METHYLCYTOSINE, GENE REGULATION, AND CANCER. Arthur D. Riggs y Peter A. Jones en *Advances in Cancer Research*, vol. 40, págs. 1-30; 1983.

THE MOLECULAR BIOLOGY OF DNA METHYLATION. R. L. P. Adams y R. H. Burdon. Springer-Verlag, 1985.

AGEING: X-CHROMOSOME REACTIVATION. Robin Holliday en *Nature*, vol. 327, n.° 6124, págs. 661-662; 5 de junio de 1985.

GENOMIC IMPRINTING: MEMORIES OF MOTHER AND FATHER. Marilyn Monk en *Nature*, vol. 328, n.° 6127, págs. 203-204; 16 de julio de 1987.

THE INHERITANCE OF EPIGENETIC DEFECTS. Robin Holliday en *Science*, vol. 238, págs. 163-170; 9 de octubre de 1987.

TRANSGENES AS MOLECULAR PROBES FOR GENOMIC IMPRINTING. M. Azim Surani, Wolf Reik y Nicholas D. Allen en *Trends in Genetics*, vol. 4, n.° 3, págs. 59-62; marzo, 1988.

DNA METHYLATION AND GENE ACTIVITY. Howard Cedar en *Cell*, vol. 53, n.° 1, págs. 3-4; 8 de abril de 1988.

Ciencia y sociedad

Archipiélago inquieto

La reciente crisis sísmica ocurrida en Canarias ha tenido un gran impacto, no tanto por la intensidad de los terremotos registrados, cuya máxima magnitud –4,6 en la escala de Richter– puede considerarse muy moderada en comparación con otras zonas sísmicamente activas del planeta, cuanto por lo insólito del fenómeno en una región considerada "asísmica", en la que no se tenía memoria histórica de episodios de esta magnitud.

Si bien su origen parece estar relacionado con un reajuste de magma en el subsuelo profundo del archipiélago –con el subsiguiente asentamiento y rotura de la corteza oceánica entre las islas de Tenerife y Gran Canaria–, sin presentar, en consecuencia, un riesgo inmediato de erupción volcánica en las islas, este fenómeno ha puesto una vez más de manifiesto las claras deficiencias existentes en las islas Canarias en lo relacionado con la detección temprana de erupciones volcánicas y sus riesgos asociados. Aunque el riesgo volcánico en esta zona es asimismo moderado si se le compara con otras regiones de vulcanismo mucho más peligroso –por su explosividad, presencia de casquetes de hielo permanente, etcétera–, es también cierto que ha aumentado bastante por el espectacular desarrollo demográfico de Canarias en las últimas décadas. La propia definición de riesgo volcánico –el producto de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de este tipo por los efectos previsibles– justifica este aumento, por haber experimentado un notable incremento el segundo de los factores.

De los dos agentes de riesgo existentes en el archipiélago, el sísmico y el volcánico, solamente al segundo pueden aplicarse técnicas de detección anticipada. El riesgo sísmico sólo admite previsiones pasivas, fundamentalmente de tipo constructivo y de planeamiento de medidas de protección civil, ya que la tecnología actual no dispone de medios para detectar con antelación la ocurrencia de un terremoto, teniendo que limitarse al registro del fenómeno y su ubicación lo más precisa posible. Carecen de interés, en este aspecto, los episodios de baja intensidad –< 2,5–, por lo que las redes destinadas a la detección de estos eventos suelen estar diseñadas para la localización de seísmos de mayor magnitud. En este sentido, la Red Sísmica puesta a punto en el archipiélago por el Instituto Geográfico Nacional como parte de la Red Nacional cumple perfectamente estos objetivos.

La atención al riesgo volcánico es muy diferente [*véase* "Riesgo volcánico", por Juan Carlos Carracedo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, *abril de 1988*]. Este fenómeno, que supone la generación de magma a gran profundidad y su eventual ascenso a la superficie, desencadena procesos de ritmo más lento y fácilmente detectables, en condiciones favorables y con los medios adecuados, en la fase que antecede –de años a días– al fenómeno eruptivo. Entre estos procesos –aumento de temperaturas en superficie y en aguas subterráneas, deformaciones y fisuración del terreno, cambios en la composición e intensidad de las emanaciones gaseosas, variaciones en el campo magnético local, etcétera– destacan por su poder resolutivo el registro y análisis de la actividad microsísmica (de magnitud inferior a 2,3-2,5), casi siempre detectable únicamente en un entorno reducido del edificio volcánico en inminente actividad –por lo que carecen de importancia en las redes regionales de localización de terremotos–. La precisa localización de estos "microseísmos" permiten configurar la disposición en profundidad del magma y su eventual ascenso, así como anticipar, en casos favorables, el lugar y momento de inicio de la erupción.

La historia volcánica reciente de Canarias pone en evidencia que, aunque todas las islas –a excepción tal vez de La Gomera– son volcánicamente activas, el riesgo sólo es apreciable en las que han tenido erupciones en época histórica –los últimos 500 años–, lo que lo limita a las de Tenerife y La Palma, y en menor grado a Lanzarote.

Una red instrumental que atendiera adecuadamente a la detección temprana de erupciones volcánicas en las islas Canarias, de bajo coste relativo –unos 37 millones de pesetas–, debería contar con cinco estaciones en Tenerife y La Palma –mínimo necesario para una localización precisa de la profundidad de los focos– y una al menos en Lanzarote. En la configuración de estas redes un par de ordenadores interconectados pueden atenderlas permanentemente, analizando y registrando de forma continua y en tiempo real la actividad microsísmica, a la vez que permiten, a partir de un nivel prefijado de alerta, el aviso telefónico automático a personas implicadas directamente en el tema (protección civil, investigadores, etcétera). (J.C. Carracedo y V. Soler, de la Estación Volcanológica de Canarias, y M. García, del Instituto de Geofísica de Zurich.)

Arqueología molecular

La evolución del hombre es un proceso molecular. Su estudio debe centrarse, pues, en ese nivel. Sin embargo, hasta hace poco los arqueólogos habían de conformarse con el examen de las secuencias de ADN de los humanos actuales, secuencias de las que inferían las existentes en el pasado. Una nueva técnica, la reacción en cadena polimerasa o RCP, permite obtener secuencias de nucleótidos de ADN antiguo y compararlas directamente con las secuencias actuales. Uno de los primeros estudios realizados con dicha técnica es el de un cerebro de 7000 años, que ha permitido un mejor conocimiento del poblamiento del continente norteamericano.

La RCP nos faculta para multiplicar o copiar determinada secuencia de ADN varias veces. Tras la multiplicación, la información que aporta el segmento de nucleótidos puede descifrarse ya sin problemas por métodos conocidos. Gracias a la RCP, se han recuperado secuencias de ADN de material genético dañado o escaso, hasta ahora imposibles de obtener. La nueva técnica ha conseguido resultados revolucionarios en campos muy dispares, el último en el de la arqueología.

Es en ese dominio donde adquiere especial interés porque permite trabajar con ADN antiguo, terreno vedado a las técnicas tradicionales de clonaje (replicación) de genes. Desde hace cierto tiempo, se sabe que los tejidos humanos y de otras especies se conservan en los especímenes de museo, momificados o congelados en hielo. Pero, en todos estos tejidos, los procesos degradativos han roto el ADN en pequeños fragmentos y lo han dañado de tal forma que no son aplicables los métodos habituales de secuenciación. La RCP, en cambio, puede trabajar con los pequeños fragmentos de ADN inalterados que persisten en el interior de moléculas de mayor tamaño dañadas.

Recientemente, Svante Pääbo, de la Universidad de California en Berkeley, ha aprovechado las ventajas del nuevo método para obtener secuencias de

ADN de restos humanos encontrados el año pasado en Little Salt Spring, ciénaga del suroeste de Florida. Por datación con ^{14}C se supo que dichos restos tenían una edad aproximada de 7000 años; pertenecían, pues, al período Arcaico Medio de la prehistoria de los primeros pobladores americanos. Para sorpresa de todos, gracias a las condiciones anaeróbicas y neutras de la ciénaga, se conservó el cerebro entero, aunque en una forma algo aplastada.

Pääbo trabajó con ADN mitocondrial. Las mitocondrias son orgánulos que proporcionan la energía necesaria a la célula. Todas las mitocondrias de un organismo derivan de la ovocélula, no del espermatozoide; por tanto, sus genes son todos de origen materno. Los genes mitocondriales presentan una alta tasa de mutación, gracias a lo cual se han convertido en magníficos indicadores del desarrollo de la especie humana durante la prehistoria, proceso breve en términos evolutivos. (Allan C. Wilson, colega de Pääbo, ha analizado secuencias de ADN mitocondrial actual y ha llegado a la conclusión de que el hombre de nuestros días desciende de una mujer que vivió en Africa hace unos 200.000 años.)

Las secuencias de ADN de Little Salt Spring podrían ayudar de forma decisiva en las estimaciones de los antropólogos sobre el número inicial de individuos que inmigraron en el continente americano. En principio, se considera que la migración inicial de Asia a Alaska fue relativamente escasa, suposición apoyada en el hecho de que, entre los nativos actuales de América, sólo se conocían tres líneas evolutivas de ADN mitocondrial. Pääbo y sus colaboradores caracterizaron una secuencia mitocondrial hasta entonces desconocida en el cerebro de la ciénaga de Little Salt Spring, de la que se infería la existencia de una cuarta línea evolutiva, que se habría extinguido algo después del momento inicial de migración.

Más allá de los descubrimientos concretos a partir del material de Little Salt Spring, la RCP puede abrir nuevas líneas de investigación en arqueología. Pääbo y sus colegas han utilizado esta técnica para obtener secuencias de ADN del cuerpo de un sacerdote egipcio (de 4000 años) y de un mamut congelado en el glaciar siberiano (40.000 años); otros proyectos están ya en marcha. Como Pääbo señala en un artículo reciente en el *Journal of Biological Chemistry:* "Los avances en las técnica de biología molecular nos han permitido recuperar... antiguas moléculas de ADN y acceder así a los más íntimos secretos de la evolución."

Malas compañías

En el curso de la evolución, sabíamos, se va modificando el comportamiento animal. Menos claro estaba que la evolución podía provocar una alteración directa del comportamiento del huésped, instada por su parásito. Sin embargo, Jacques Brodeur y Jeremy N. McNeil, de la Universidad Laval en Quebec, han observado un control de este tipo en un parásito de insectos. Dichos autores han visto cómo las larvas de una avispa parásita modifican el comportamiento de su especie huésped, el pulgón o áfido de la patata; lo hacen de diferentes formas, según los intereses particulares del parásito.

La hembra de la avispa *Aphidus nigripes* inyecta sus huevos en el pulgón; cuando las larvas eclosionan, inician una lenta consumición del áfido parasitado hasta matarlo. Terminado el ciclo de su desarrollo, las larvas abandonan los restos momificados del áfido. Ahora bien, si se acerca el invierno, el parásito (propiamente el parasitoide, ya que mata su huésped) puede permanecer dentro de los restos del áfido, iniciando un largo período de suspensión de actividad, llamado diapausa, hasta que llegan condiciones más favorables con la primavera.

En un artículo reciente de *Science,* Brodeur y McNeil señalaron que los áfidos no parasitados permanecen generalmente en el envés de las hojas, donde se alimentan a su gusto, mientras que los parasitados se desplazan hasta el haz de la hoja antes de morir. Antes de iniciar sus estudios ajustaron las condiciones experimentales de las colonias de laboratorio de pulgones parasitados de suerte que aproximadamente la mitad de los parásitos entraran en el período de diapausa.

Brodeur y McNeil investigaron a continuación si podían distinguir entre los efectos sobre el huésped de la larva de avispa diapáusica y los producidos por la larva no diapáusica. Observaron diferencias claramente significativas: los áfidos parasitados por larvas de avispa en diapausa tenían tendencia a abandonar la planta y esconderse en sitios protegidos antes de morir, mientras los áfidos con larvas no diapáusicas permanecían en la planta.

Se sabe que muchos parásitos alteran el comportamiento de sus huéspedes; pero lo que resulta novedoso es la capacidad selectiva de *A. nigripes,* que sólo obliga a su huésped a esconderse cuando dicho comportamiento implica una mejor adaptación para su propio desarrollo. Brodeur y McNeil sugieren que las larvas en diapausa inducen a sus huéspedes a alojarse en sitios resguardados antes de morir, de manera que el parásito esté protegido ante los cambios de temperatura y los posibles depredadores durante el invierno.

En un segundo experimento emplearon una especie de avispa hiperparásita: una avispa que deposita sus larvas en pulgones ya parasitados, momificados, donde se alimentan del primer parásito. Brodeur y McNeil observaron que los áfidos parasitados por larvas de avispa diapáusicas –que se encontraban por lo tanto ocultos– eran atacados con menor frecuencia por los hiperparásitos. Los áfidos de la patata, asesinados por *A. nigripes,* se ven obligados a proteger a sus verdugos.

Colisiones cósmicas

Dos astrofísicos han logrado generar galaxias elípticas, simulando el choque de dos galaxias ordinarias en el espacio profundo de un superordenador.

Más de dos tercios de las galaxias, incluidas las espirales como nuestra Vía Láctea, presentan una morfología discoidal. Las galaxias elípticas, por contra, ofrecen mayor variedad de formas, en una gama que va de los elipsoides a las esferas; tienden, además, a adquirir un mayor tamaño y poseen, con frecuencia, "núcleos activos": regiones centrales donde emiten cantidades ingentes de radiación.

Hasta hace poco, creíase que las galaxias elípticas representaban los restos de una fase precoz de la formación galáctica y que las galaxias espirales aparecieron más tarde. Recientemente, algunos astrofísicos lanzaron una idea alternativa, según la cual hubo primero galaxias de disco que, tras chocar entre sí, dieron origen a las elípticas. Los cálculos realizados con ordenador por Joshua E. Barnes y Lars Hernquist, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, corroboran ese nuevo enfoque.

Barnes puso los cimientos. Se dedicó durante varios años al desarrollo de un programa de ordenador que simulara de qué manera las fuerzas de gravedad ejercidas por las estrellas y por la materia oscura —a la que se atribuye más del 90 por ciento de la masa total de la mayoría de galaxias— podrían condicionar las interacciones entre dos o más galaxias. Barnes ha llegado a la conclusión de que si una galaxia pasara a unos pocos diámetros galácticos de otra (a

título de ejemplo, el diámetro de la Vía Láctea se cifra en 100.000 años luz) podrían quedar ambas gravitatoriamente atrapadas y correr inexorablemente hacia una colisión posterior. Mil millones de años después de la colisión, el objeto cósmico resultante sería una galaxia elíptica.

Hernquist incluyó el gas interestelar en el modelo de Barnes. Y ofreció una razón plausible de por qué muchos núcleos de galaxias elípticas muestran una altísima actividad. De acuerdo con la teoría aceptada, esos núcleos hiperactivos sólo pueden formarse cuando se precipitan ingentes cantidades de materia en el interior de un agujero negro, que a menudo eclipsa el resto de la galaxia. Pero, ¿quién aporta esa masa al agujero negro? Según los cálculos de Hernquist, el choque entre dos galaxias de disco arrastraría enormes cantidades de gas hacia el centro de la galaxia elíptica, recién formada. Esa concentración de gas abonaría la creación del agujero negro y lo abastecería, casi ilimitadamente, de materia.

El trabajo de Barnes y Hernquist ha acallado muchas de las críticas que la teoría de las colisiones galácticas había suscitado. Este tipo de simulaciones podría servir para orientarnos sobre el futuro de la Vía Láctea, en su camino hacia Andrómeda a unos 120 kilómetros por segundo.

1

2

3

4

5

*CHOQUE ENTRE DOS GALAXIAS ESPIRALES, simulado por el Superordenador del Centro de Informática de Pittsburg. Dos galaxias espirales formadas por estrellas (*rojo*), gas (*azul*) y materia oscura invisible se aproximan hasta colisionar. El producto resultante presenta un núcleo de gas denso (*blanco*) y dos largas colas o "antenas", que recuerdan algunas de las galaxias elípticas que se pueden observar en el firmamento.*

El secreto de Stradivari

Durante siglos los musicólogos se han preguntado por qué los violines construidos por Antonio Stradivari o los clavicordios de los Ruckers producen su sonido maravilloso. Para algunos expertos, el secreto yace en la forma de curar las tablas; para otros, el secreto está en las resinas utilizadas.

Acaba de aparecer otra hipótesis. La propone Tillmann Steckner, constructor de clavicordios de la ciudad canadiense de London. En su opinión, los maestros del Barroco utilizaron la luz solar como un medio de diagnóstico de sus instrumentos. La idea se le ocurrió ya en 1974, cuando dejó por casualidad, ante la ventana, una tabla de armonía de un clavicordio. La luz irradió la lámina de abeto (madera empleada en la mayoría de los instrumentos de cuerda y teclado) y puso de relieve su estructura interna. Aunque la superficie de la madera se creía uniforme, la luz evidenciaba que había zonas más densas, y por tanto más oscuras, que otras.

Se adentró luego en el estudio de la bibliografía pertinente. Y se enteró de que las tablas de algunos violines y las tablas de armonía de algunos clavicordios mostraban variaciones irregulares de su grosor. Creyendo algunos restauradores que eran imperfecciones, afinaron las maderas hasta conseguir un espesor uniforme; pero sus esfuerzos no sirvieron más que para echar a perder el sonido del instrumento.

Steckner se preguntó si Stradivari y otros maestros usarían la luz natural para identificar las zonas más densas de la madera y alisarlas después. Quizás esta técnica mejoraba la resonancia de la madera contribuyendo a que la distribución global de masa, más que el espesor; fuera uniforme. Steckner decidió probar su teoría, no con la luz del sol, sino con luz eléctrica, en un clavicordio que estaba construyendo para la capilla de santo Tomás de Leipzig, cuyo maestro fue, tiempo atrás, Bach.

Steckner sostiene que el clavicordio que acaba de construir resuena mejor que todas sus creaciones anteriores. Los expertos que lo han oído corroboran esa apreciación optimista. Pero Steckner no está solo. Konrad Leonhardt, famoso constructor también de violines, comienza a aplicar esta técnica con éxito.

Ciencia y empresa

¿Qué son los hipermedios?

Una alumna de segunda enseñanza debe elaborar un trabajo escolar sobre las mujeres en la historia de América. Se planta ante el ordenador conectado a un monitor de vídeo y repasa un cortometraje sobre la inmigración. Toma el ratón y detiene la película en la imagen de una mujer; aparece en la pantalla una "ficha" que contiene información sobre mujeres inmigrantes. Picada su curiosidad por una referencia a la industria del tejido, llama a otra ficha sobre industrialización; ve escenas de mujeres en las fábricas. Al par de ello, va almacenando sectores de las imágenes en un fichero electrónico para cuando redacte el informe. Cambiemos de lugar. Entremos en el despacho de un directivo de una compañía telefónica interesado en ofrecer nuevos servicios a los clientes. Su ordenador le va desgranando, uno a uno, los servicios que está preparando la Bell Communications Research (Bellcore). Le ofrece más detalles: "fichas" sobre programas y soportes necesarios para poner en funcionamiento un servicio, con sus costes y ventajas.

Son dos instantáneas de los hipermedios, la nueva manera de gestionar la información. El proyecto sobre la historia de los Estados Unidos saldrá, patrocinado por el *National Geographic* (en colaboración con la empresa "Lucasfilm"), en enero. Varias compañías telefónicas usan ya el paquete de Bellcore. ¿Se trata sólo de nuevas bases de datos? No, dicen los creadores. Los hipermedios constituyen una manera diferente de organizar la información de muchos vehículos de comunicación: textos, películas, cintas de vídeo y sonido. Se apoyan en los ordenadores, videodiscos y monitores para crear una biblioteca de multimedios a la medida de las diferentes necesidades del usuario.

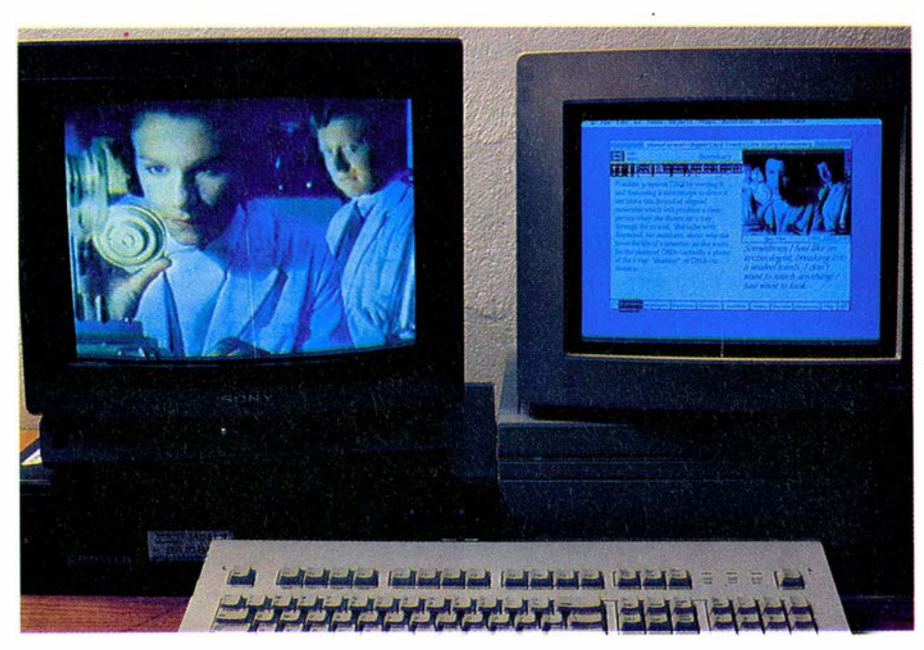
Los sistemas varían desde útiles para la enseñanza, fundados en bases de datos limitadas, hasta programas complejos para manejar corrientes de información cambiantes en negocios y en tecnología. El hilo conductor que los liga es su carácter no lineal; o lo que es lo mismo, la ausencia de cualquier hilo conductor. En vez de llevar al usuario directamente hacia la información, los hipermedios permiten que éste se abra su propio camino. Suponen un paso más para alejarse de los sistemas limitados a los iniciados en informática y aproximarse hacia sistemas que se acomoden mejor a la manera de pensar de la gente.

La inspiración de los hipermedios arrancó de un artículo publicado por la revista *Atlantic Monthly*, en 1945. Su autor, Vannevar Bush, dirigió la comisión de Investigación Científica y Desarrollo durante la Segunda Guerra Mundial. Bush predijo que la ciencia desarrollaría un nuevo enfoque para organizar la información. En su supuesto, un "memex" –una especie de agente inteligente– ayudaría a la gente a crear bases de datos hechas a su medida.

Los cimientos científicos de los hipermedios se pusieron a finales de la década de los sesenta. Pero hubo que esperar la llegada de ordenadores potentes y baratos, y técnicas de almacenamiento de información (los videodiscos), para hacer viables los hipermedios. En 1987, Apple Computer lanzó su conjunto de rutinas "HyperCard", que se convirtió en plataforma para todo un enjambre de proyectos, entre ellos el del *National Geographic* y el de Bellcore. HyperCard recuerda, en su operación, al fichero electrónico. Los hechos se registran en tarjetas electrónicas que se barajan hasta quedar en el orden deseado.

La unión de estas tarjetas electrónicas con diapositivas, cortometrajes en vídeo y sonido –que son la esencia de estos primitivos proyectos de hipermedios– puede transformar las lecciones en clase, según Kristina Hooper, directora del laboratorio de multimedios en Apple. Los alumnos pueden leer notas sobre un descubrimiento científico, escuchar una entrevista con el investigador que lo realizó y explorar los diagramas que describen el hallazgo en cuestión.

John Steinbeck y Shakespeare aparecerán muy pronto en el mercado de los hipermedios. Con la lectura de *Las uvas de la ira*, los alumnos conocerán la historia de la Gran Depresión con sólo pedirle al ordenador las charlas junto al fuego de Franklin D. Roosevelt, estadísticas sobre las cosechas y las canciones de Woody Guthrie. Los estudiosos de Shakespeare pueden "poner en escena electrónica" sus obras, y escoger entre un amplio reparto de personajes almacenados en videodisco. Los futuros médicos asistirán a una profunda lección de anatomía cabe el "cadáver eléctrico" del Hospital Clínico de la Universidad de Stanford. Se les ofrece, primero, un esqueleto completo; se puede, después, examinar la articulación de un hombro, o estimular un nervio y observar el efecto so-



LOS HIPERMEDIOS conectan una pantalla de vídeo a una base de datos. En esta presentación sobre el ADN, desarrollada conjuntamente por Apple Computer, Lucasfilm y la Institución Smithsoniana, los estudiantes pueden aprender la información científica escondida tras las imágenes deteniendo la pantalla y explorando la base de datos de ordenador. Fotografía de Ed Kashi.

bre las demás regiones. "Cuando se llega a una masa crítica de material interrelacionado, esta clase de sistema reviste un extraordinario interés", dice Steven J. Freedman, uno de los autores del proyecto.

Los críticos temen que esos medios aporten más espectáculo que conocimientos sólidos. Las sesiones de multimedios generados por ordenador extenderían, en su opinión, la habituación televisiva con el estímulo de nuevas experiencias, en vez de impartir mayores conocimientos. No comparten ese sentimiento los educadores que tratan con alumnos reacios a la letra impresa. Si asimilan mejor la información con los hipermedios, la nueva técnica constituirá una valiosa herramienta de clase, observa Mary Alice White, de la Escuela de Formación del Profesorado de la Universidad de Columbia.

Otros investigadores han ido más allá de las fichas y pretenden crear sistemas de hipermedios que sean textos enteros, libros y manuales, más accesibles. Se ahorra tiempo en la búsqueda de la información necesaria. Partiendo de una frase clave, se identifican secciones, aun cuando la sintaxis deje mucho que desear. El "superlibro" de Bellcore condensa ya títulos de capítulos, antes y después de cada sección, para dar una visión global del material circundante.

La organización de piezas de información en un entramado no lineal se adapta al manejo de proyectos de gran complejidad, afirman los investigadores. Hay empresas de microprocesadores que comienzan a recurrir a los hipermedios para gobernar la producción de nuevos conjuntos de rutinas. Varios años atrás, el buque norteamericano *Carl Vinson* se sirvió de un sistema experimental de hipermedios construido en la Universidad Carnegie Mellon para controlar las operaciones del portaaviones; Westinghouse ha explorado la manera en que los hipermedios proporcionen fácil acceso a la información para los operadores de centrales nucleares durante una emergencia.

Muchos de los hipermedios incorporan sistemas expertos. Con su ayuda, las compañías pueden desarrollar la planificación del negocio y supervisar las filiales. Si una empresa adopta normas que especifiquen que sus filiales no deben competir entre sí, el sistema avisa a la dirección del posible conflicto. ¿Cuál es el beneficio de los hipermedios? Para unos, el máximo provecho lo extraerán los duchos en informática; para otros investigadores, sin embargo, cualquiera puede sacarles partido.

Pese a ello, los proyectistas de hipermedios se enfrentan todavía a muchos problemas. ¿Hay suficiente información –tanto en textos como en vídeo– disponible para hacer una presentación completa del tema? Incluso *National Geographic* y ABC han tenido que recurrir a fuentes adicionales. ¿Quedarán anticuados los discos de láser al idearse nuevas técnicas de almacenamiento? ¿Cuáles son las características que hacen a los hipermedios valiosos y fáciles de usar?

Lo que está claro es que los hipermedios no son una invención única –como el transistor– que pueda copiarse y explotarse fácilmente por distintos fabricantes. Cada empresa habrá de idear los suyos de acuerdo con sus necesidades de organizar la información. Quienes primero lo consigan se habrán adelantado en la carrera de la información.

La calidad japonesa

A Genichi Taguchi debe divertirle la ironía del destino. Hace más de treinta años, los expertos occidentales en estadística adiestraban a las empresas niponas en la calidad de fabricación. Hoy, la filosofía del diseño de la calidad de Taguchi se impone en las empresas de Occidente.

El control de calidad está lejos de ser una novedad en el mundo libre. Los métodos analíticos para vigilarla se desarrollaron en los años veinte. Destaca la figura legendaria de W. Edwards Deming, estadístico que introdujo el seguimiento de la calidad durante la producción en las empresas japonesas. El "premio Deming" japonés a la calidad no tardó en convertirse en uno de los galardones más prestigiosos. Fue precisa la caída en picado de las ventas ocurrida a principios de nuestra década para convencer a muchos fabricantes de que había que seguir a Deming y adoptar la misma atención a la calidad que los japoneses.

Las compañías norteamericanas han asimilado la lección. Se han tomado medidas más eficaces de control de calidad en el proyecto inicial de la mercancía, pasando por su producción, hasta la entrega. No se esconde que la inspección en el último tramo de la línea de producción es, todavía, costosa. Si vale de ejemplo, directivos y obreros de la compañía McDonnell Douglas Missile Systems han recibido tarjetas de bolsillo sobre la exigencia de la calidad; entre las normas incluidas figuran los "catorce puntos para transformar la industria", de W. Edwards Deming y los principios establecidos por Taguchi para el control de la bondad del producto.

¿En qué consiste el método de Taguchi? Este japonés, experto en estadística y asesoría de empresas, habla de fabricar productos "sólidos", que durante mucho tiempo soporten el trato inmisericorde del consumidor; importa eso más que el proceso especial de manufactura. Supóngase que una empresa fabrica tejas. Imaginémonos, además, que las tejas salen irregulares porque la arcilla no se cuece de manera uniforme. Pues bien, ya que no hay forma de dominar esos factores de "ruido", reconsidérese la fabricación del producto; altérense las especificaciones de los materiales para asegurarse de que las nuevas tejas saldrán uniformes, a pesar del ruido.

Los productos sólidos de Taguchi dependen de "proyectos experimentales", concepto nacido en Inglaterra en los años veinte. Los investigadores toman una propiedad de la calidad del producto que desean medir (por ejemplo, la precisión de las dimensiones) y seleccionan los factores del producto que afectan directamente a la misma. Se alteran sistemática y simultáneamente múltiples factores y se miden los productos resultantes. Organizando los datos en matrices ortogonales, los investigadores pueden inferir los efectos de muchas combinaciones de factores. De esta manera, se reduce el número de experimentos necesario para obtener resultados significativos. "Variaremos deliberadamente hasta 10 o 20 factores, de modo que los efectos separados y la interacción de variables se pueda medir y estimar", aconseja Donald W. Marquard, jefe de estadística aplicada en DuPont.

Los experimentos sirven para acotar características menos críticas de las prestaciones del producto. Ello permite a los fabricantes sustituir técnicas y materiales por otros más baratos, reduciendo el coste por unidad. Para Taguchi, la reducción del coste es la fuerza que impulsa hacia la mejor calidad. "El objeto real de la tecnología... debería ser dejar que el coste unitario de fabricación predominase sobre la calidad", sostiene el japonés.

Taguchi no deja de tener críticos. Los estadísticos disputan acaloradamente sobre sus métodos, en particular, sobre la manera de calcular la solidez, basada en la relación de señal a ruido. Hay quien llega a afirmar malévolamente que los japoneses conocen los métodos de Taguchi, pero no aplican sus técnicas.

Fósiles del monte de San Giorgio

Un antiguo mar proporciona una rica colección de vertebrados del Triásico

Toni Bürgin, Olivier Rieppel, P. Martin Sander y Karl Tschanz

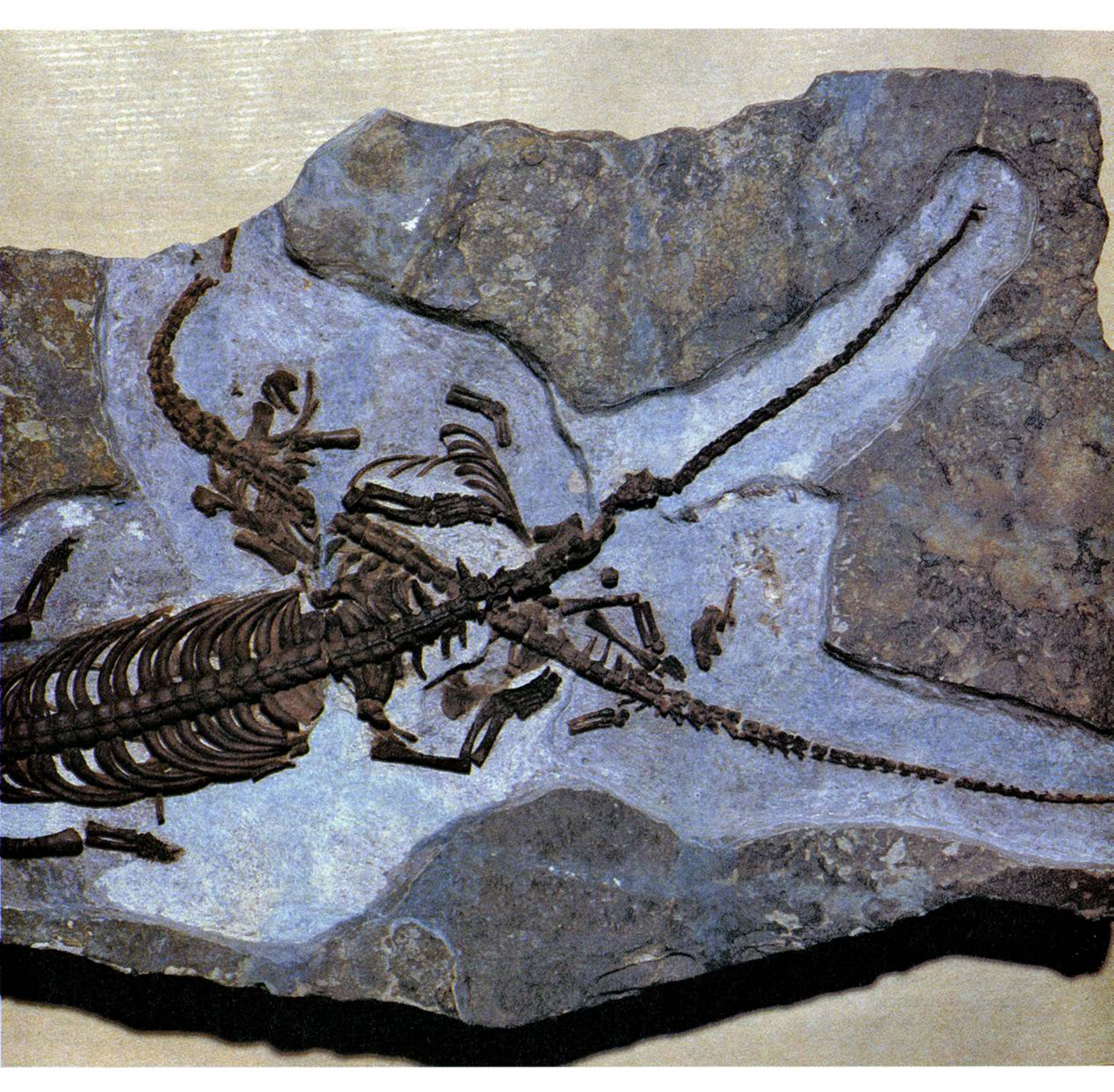
Hace poco más de 200 millones de años existía un pequeño mar donde ahora se encuentra la frontera entre Suiza e Italia. Aunque con el tiempo esta masa de agua llegó a secarse y desaparecer, los restos de sus moradores –una rica colección de peces y reptiles– se conservaron, tras su muerte, en los sedimentos fangosos del fondo de la cuenca. En el transcurso de millones de años, esos sedimentos se litificaron, se elevaron por la actividad tectónica y más tarde llegaron a convertirse en el monte de San Giorgio. Esa montaña, que se alza sobre el lago Lugano en los Alpes meridionales, constituye un centro turístico, no tanto por su pasado geológico cuanto por la vista panorámica que ofrece a quienes logran alcanzar la cumbre.

Pero es la riqueza de fósiles incluidos en sus rocas sedimentarias lo que otorga al lugar su verdadera distinción. Los millares de fósiles extraídos del San Giorgio han proporcionado a los paleontólogos una visión del pasado incomparable y algo enigmática, al mismo tiempo. La fauna representa una época central de la historia de la vida sobre la Tierra, el Triásico, período que se extendió desde 250 hasta 210 millones de años atrás. Durante ese intervalo de tiempo, bastante corto, hicieron su aparición varios grupos principales de vertebrados terrestres; entre ellos, los antepasados de la mayoría de reptiles modernos, los dinosaurios, los mamíferos y posiblemente las aves.

TONI BÜRGIN, OLIVIER RIEPPEL, P. MARTIN SANDER y KARL TSCHANZ, citados aquí en orden alfabético, investigan vertebrados fósiles en el Museo e Instituto Paleontológico de la Universidad de Zurich. Bürgin, que se ha doctorado por la Universidad de Basilea, estudia los peces fósiles del monte de San Giorgio para la Fundación Nacional Suiza de la Ciencia. Rieppel, doctorado también por la Universidad de Basilea, es "privatdozent" de paleontología de vertebrados y supervisa la investigación de los vertebrados del monte de San Giorgio. Sander, que inició su formación en la Universidad de Texas, es doctor por la de Zurich, donde obtuvo también su título Tschanz.

Los primeros fósiles del monte de San Giorgio se descubrieron en 1863, cuando Antonio Stoppani, director del Museo de Historia Natural de Milán, tropezó con varios restos de vertebrados (algunos peces y unos pocos reptiles) en la base de la montaña, cerca de Besano, pequeña aldea del norte de Italia. De regreso a Milán, entregó los fósiles a Francesco Bassani, quien los clasificó taxonómicamente y publicó una descripción breve de los mismos. Aunque Stoppani volvió al yacimiento en 1878 y recolectó varios ejemplares más, la lacónica reseña de sus hallazgos despertó escaso interés. Los fósiles de la zona no volvieron a convertirse en foco de atención hasta entrado el siglo XX, 40 años más tarde, cuando las pizarras bituminosas (rocas sedimentarias ricas en materia orgánica) del San Giorgio fueron explotadas para la extracción de un compuesto oleaginoso llamado saurol (considerado entonces un remedio eficaz contra el reumatismo).

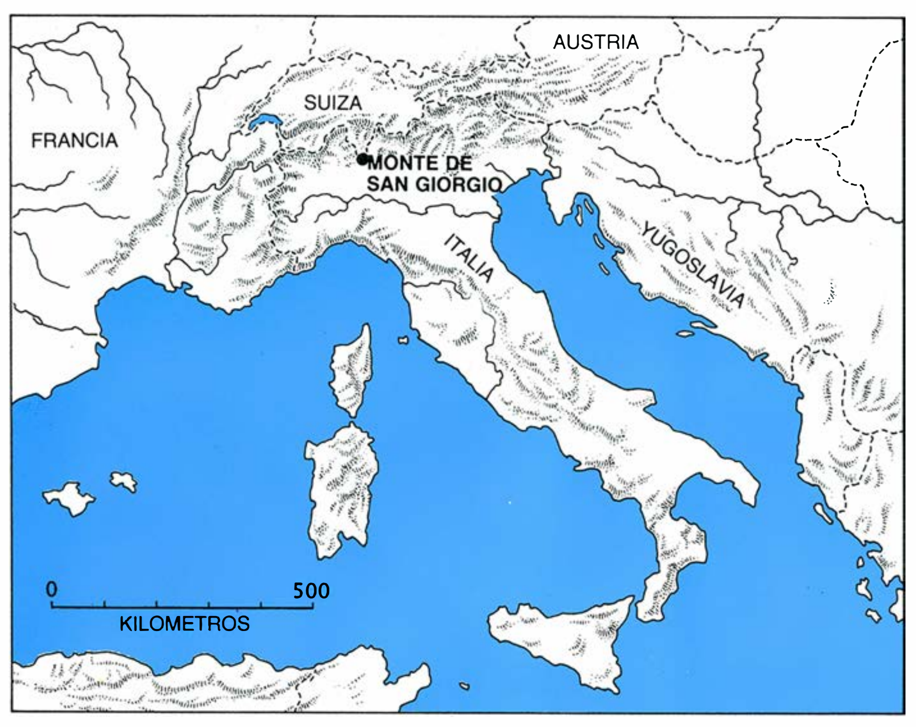
Corría el año 1919. Bernhard Peyer, joven zoólogo de la Universidad de Zurich, estaba echando una ojeada a un montón de escombros de pizarras cercano al lugar de extracción del saurol. Mientras examinaba las piezas, un golpe de su martillo dejó al descubierto un fragmento de pizarra en el cual había quedado preservada una extremidad en forma de paleta perteneciente a un ictiosaurio, reptil marino extinto. Hasta aquel momento no se había descubierto en Europa ningún fósil comparable de ese período. Según era de esperar, el descubrimiento de Peyer suscitó gran interés. Estimulado por la importancia de su hallazgo, dedicó buena parte de su vida a la búsqueda sistemática de nuevo material fósil procedente de aquella región. Cuando se retiró en 1956, la tarea de recolectar y catalogar fósiles pasó a su sucesor Emil Kuhn-Schnyder, quien añadió miles de nuevos ejemplares a la colección de la Universidad de Zurich. Hoy día, gracias a estos dos hombres, se considera que el Museo e Instituto Paleontológico de la Universidad de Zurich alberga una de



1. EL NOTOSAURIO Serpianosaurus, *reptil extinto, abunda en las pizarras del monte de San Giorgio. A primera vista, se parece a un lagarto, pero fue un anfibio que pasaba parte del tiempo en el agua y parte en tierra firme. Esta especie alcanzó unos 70 centímetros de longitud. Tenía un cuello largo y flexible y se alimentaba probablemente de peces pequeños. Cerca de la base de la cola, y formando ángulo recto con ella, se distingue la espina dorsal de otro individuo.*

las mejores colecciones del mundo de vertebrados marinos del Triásico, de los que más de 4500 ejemplares proceden del monte de San Giorgio.

Por el estudio de la estratigrafía y naturaleza de aquellos sedimentos, los geólogos han podido determinar que, durante el período Triásico, la cuenca de San Giorgio no presentaba una gran extensión: el diámetro estimado es de seis a diez kilómetros y la profundidad de unos cien metros. El análisis detallado de los datos estratigráficos y pa-



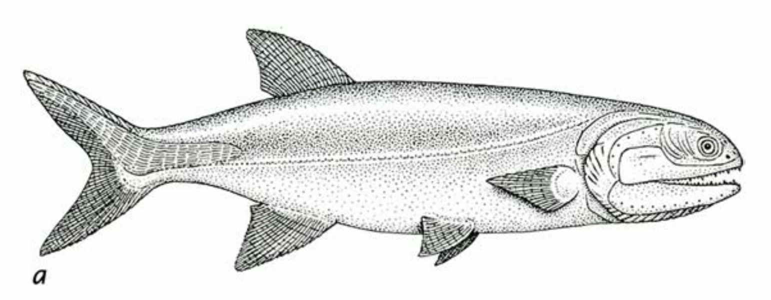
2. MONTE DE SAN GIORGIO. Se levanta en los Alpes meridionales, cerca del lago Lugano y no lejos de la frontera entre Suiza e Italia. La mayoría de los fósiles proceden de las capas que afloran en la vertiente sur de la montaña, al norte y noroeste de las aldeas suizas de Meride y Serpiano.

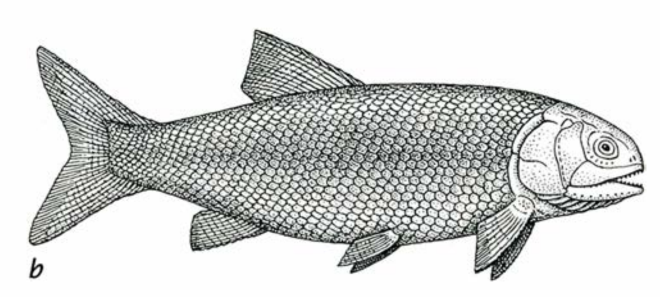
leontológicos señala que la cuenca no estaba muy alejada de lo que era la costa de un antiguo océano, conocido como el mar de Tethys, predecesor del actual Mediterráneo. Aunque la cuenca en sí estaba rodeada por arrecifes coralinos y por tierra emergida, la presencia de especies pelágicas (procedentes del mar abierto) indica que, al menos de modo intermitente, estaba conectada con el océano.

De acuerdo con Hans Rieber, director actual del Instituto Paleontológico, el fondo de la cuenca estaba constituido por lodos finos; cuando los animales que vivían en dicha cuenca morían, sus cuerpos caían hasta el fondo, donde reinaban condiciones anóxicas (sin oxígeno); de ese modo, sus restos, que en condiciones normales se habrían descompuesto por la acción de las bacterias aeróbicas y de otros carroñeros, quedaban protegidos de la putrefacción. En el curso de muchos miles de años se acumularon y petrificaron nuevas capas de fango, comprimiendo y aplastando los esqueletos de los animales, al tiempo que se litificaban. En algunos casos, la fuerza de compresión aplastó los esqueletos de modo tan intenso que la interpretación de los detalles anatómicos finos se hace muy difícil, si no imposible. No obstante, la mayoría de los fósiles están bien conservados, y hoy, 200 millones de años después de la muerte de aquellos animales, pueden distinguirse claramente huesos delicados y detalles muy finos: espinas o escamas diminutas.

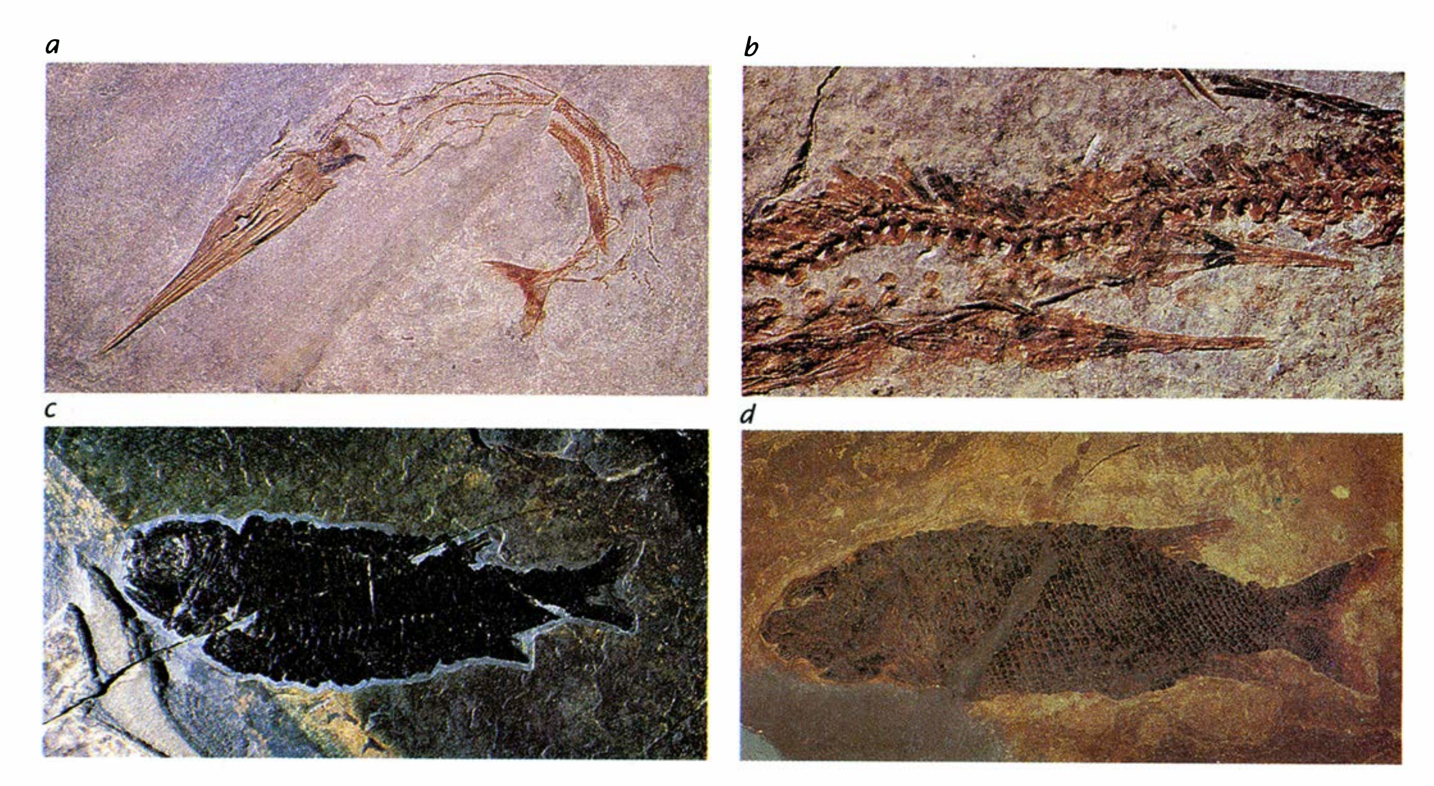
Se aprecia fácilmente, incluso por el profano, que la cuenca de San Giorgio dio cabida a una amplia diversidad de especies animales. Por ceñirnos al grupo de los peces, la cuenca puede considerarse análoga a un arrecife coralino moderno. Hasta ahora se han identificado cinco especies de tiburones; cuatro de ellos, aunque de complexión robusta, alcanzan una talla moderada y están provistos de unos dientes trituradores que sugieren una dieta de crustáceos. La quinta especie, representada solamente por una espina bastante grande que funcionaba como una aleta y por algunos dientes, se supone que tendría una longitud de dos a tres metros y que se alimentaría también de crustáceos. Igual que ocurre con los fósiles de tiburones de otras localidades, los especímenes de San Giorgio están representados, sobre todo, por piezas dentarias, junto con alguna que otra espina del mismo tipo que la mencionada antes, y piezas de la espina dorsal (los tiburones, a diferencia de los peces óseos, poseen un esqueleto cartilaginoso que se deteriora rápidamente después de la muerte). Con todo, se han hallado varios ejemplares casi completos de tiburones, aportando un testimonio más de las propiedades de conservación excepcionales del lugar.

Los peces de aletas lobuladas se encuentran en cantidad limitada, pero los recuperados tienden a estar completos merced a sus escamas, duras y de aspecto esmaltado, que han resistido la putrefacción. Estos peces, miembros de un orden en su mayor parte extinto llamado Actinistia (grupo al que pertenece el celacanto actual, *Latimeria*), han recibido especial atención porque se les considera relacionados con el grupo ancestral común a partir del cual derivan todos los vertebrados terrestres. En las pizarras de San Giorgio se han recolectado más de 20 ejemplares; todos se inscriben en alguna de las tres categorías de tamaño definidas. Una distribución discreta en la talla, como la observada, nos con-





3. SERIES DE PECES CON ALETAS RADIADAS recuperados de las pizarras bituminosas del monte de San Giorgio. Hasta ahora se han recolectado unos 550 especímenes pertenecientes a unos 30 géneros. Sus representantes, dibujados aquí a escala, forman tres grupos distintos en razón de su talla. En una de las categorías se incluyen los grandes peces predadores, así **Birgeria stensiöi** *(***a***), que llegó a alcanzar más de un metro de longitud,* **Colobodus bassanii** *(***b***), que tenía unos*

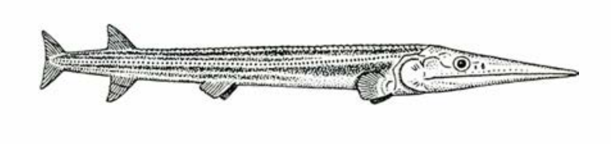


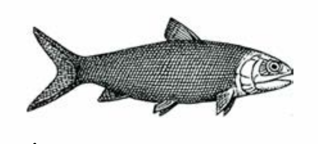
4. EXCELENTE CONSERVACIÓN de los fósiles de San Giorgio, puesta de relieve en esta composición de ejemplares de peces con aletas radiadas. Se destacan detalles muy finos, como las aletas de la zona caudal o el hocico alargado del pez lagarto **Saurichthys** *(***a***); más llamativa aún es la presencia de dos embriones en el interior del abdomen de una hembra (***b***), prueba de que estos peces eran ovovivíparos. En este ejemplar de* **Peltopleurus** *(***c***), pez pequeño y sólidamente acorazado, se puede ver, justo bajo la cola, una aleta anal altamente modificada. La aleta presenta radios verticales a modo de ganchos que pudieron haber cumplido cierta misión durante el apareamiento, al permitir que los machos se sostuvieran sobre las hembras. Otra especie, todavía sin describir (***d***), es conocida informalmente como "dientes grandes", en alusión a la insólita dentición del animal; su dieta constituye un misterio.*

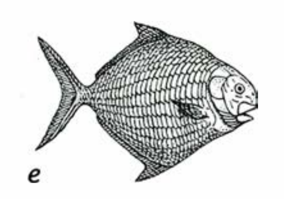
duce a suponer que los grupos de tamaño pueden reflejar especializaciones ecológicas, dietéticas tal vez. Los ejemplares mayores, que miden unos 70 centímetros de longitud, se alimentaban, verosímilmente, de peces pequeños. Los menores, en cambio, sólo tenían 20 centímetros de largo y desconocemos sus preferencias alimentarias.

Se han catalogado más de 550 especímenes, bien conservados, de peces con aletas radiadas (el grupo al que pertenecen la mayoría de los peces actuales). Aunque la mayoría se hallan todavía por estudiar con detalle, esperamos que su análisis minucioso nos depare nuevos datos sobre la evolución y las relaciones de los peces de aletas radiadas con otros grupos. Hasta el momento, estos peces han suministrado ya una valiosa información acerca de la paleoecología de la cuenca de San Giorgio. La presencia, por ejemplo, de formas que corresponden a nadadores rápidos, habitantes del océano, proporcionan parte de las pruebas que señalan la conexión intermitente de la cuenca con el mar de Tethys. Un indicador de este tipo es el pez *Birgeria*, que gozó de amplia difusión durante el Triásico y abunda en muchos yacimientos de ese período.

Es muy reciente la atención prestada al estudio de los peces. Los reptiles de San Giorgio, sin embargo, vienen polarizando la curiosidad de los paleontólogos desde que Preyer publicase el primer artículo sobre ellos. Los más abundantes, y quizá los mejor estudiados, son los anfibios notosaurios, miembros de un extenso y común orden de reptiles triásicos llamado Sauropterygia. Los notosaurios descienden de una rama de sauropterigios terrestres y retienen muchos de los rasgos de sus antepasados; las extremidades, por ejemplo, no estaban especialmente adaptadas para la locomoción acuática. A diferencia de muchos reptiles acuáticos, entre los que se incluyen los ictiosaurios, cuyas extremidades se habían modificado hasta convertirse en paletas y cumplían, por tanto, un papel esencial para impulsar el animal dentro

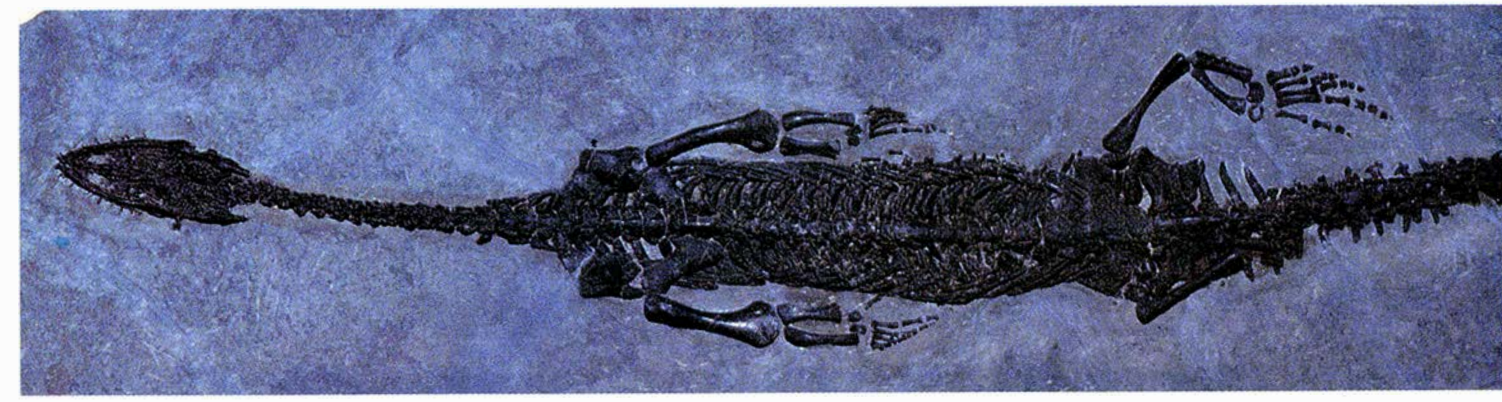


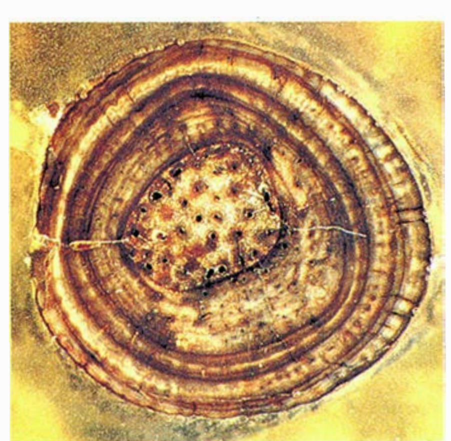






70 centímetros de largo y **Saurichthys curionii** *(***c***), con aproximadamente 60 centímetros de longitud. En otra categoría se encuentran los peces de talla media, como* **Ptycholepis barboi** *(***d***), de unos 30 centímetros de longitud y superficialmente parecido a la caballa actual, y* **Bobasatrania** *(***e***), habitante de los arrecifes de coral. En la categoría de menor talla se encuadran peces del tipo de* **Peltopleurus** *(***f***), que tenían cinco centímetros, o menos, de longitud.*

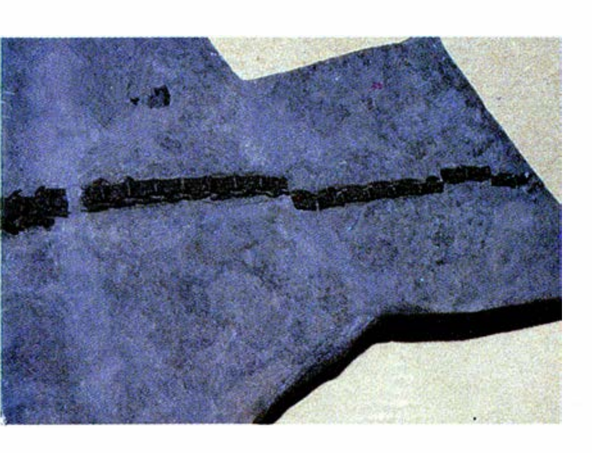




5. EL MENOR de los reptiles del monte de San Giorgio, y el más abundante también, es Neusticosaurus (arriba)*. Las patas del animal estaban mejor adaptadas para remar dentro del agua que para avanzar sobre tierra firme. Una sección delgada del hueso de una extremidad de un* Neusticosaurus (izquierda) *revela la presencia de anillos de crecimiento anuales. El animal del que procede esta sección delgada del hueso tenía cinco años cuando murió; el diámetro del hueso es de 4,1 milímetros.*

del agua, los notosaurios avanzaban, eso se cree, mediante ondulaciones laterales del tronco y la cola. Además de cola larga y aplastada, la mayoría poseían un cuello largo y flexible y probablemente eran expertos en atrapar peces pequeños mientras nadaban.

Los notosaurios de San Giorgio presentan una amplia gama de formas y tamaños —desde *Ceresiosaurus*, que alcanzó tres metros de longitud, hasta *Neusticosaurus*, el lagarto enano, que por término medio sólo medía 30 centímetros de largo—. En conjunto, se han registrado alrededor de 400 ejemplares, que ilustran todos los estadios de su ciclo de vida, desde embriones hasta individuos adultos. El desarrollo de estos animales puede investigarse gracias a que los notosaurios, como todos los reptiles de sangre fría, crecían añadiendo nuevo tejido óseo en forma de anillos de crecimiento anuales. Las secciones delgadas de sus huesos (secciones con un grosor de unas 50 micras) pueden examinarse en el microscopio y contar así los anillos. Los minuciosos análisis de los anillos de crecimiento (posibles gracias al gran número de ejemplares de notosaurios que existen en la colección del Instituto) revelan que llegaban a la madurez sexual hacia los tres o cuatro años de edad y vivían un máximo de seis.



Relacionados con los notosaurios, aunque totalmente acuáticos, encontramos los placodontos: un grupo de reptiles marinos, cortos y robustos. Tenían dientes anchos y aplanados y se alimentaban principalmente, suponemos, de bivalvos y otros moluscos hallados a lo largo del borde de la cuenca. Los dos géneros de placodontos conocidos en el monte de San Giorgio son *Cyamodus* y *Paraplacodus*.

Otro grupo de reptiles ampliamente representados en el monte de San Giorgio son los Archosauromorpha. Los fósiles pertenecientes a esa categoría constituyen un conjunto importante poco conocido; presentan un destacado interés por incluirse en el grupo que con el tiempo dio origen a los dinosaurios. Uno de los arcosauromorfos más extraños —quizás incluso el reptil más desconcertante de cuantos se han descrito— es *Tanystropheus*. Conocido como el saurio con cuello de jirafa, *Tanystropheus* se ha convertido en algo así como la mascota de la fauna fósil de

6. EJEMPLAR de Ceresiosaurus, *rodeado aquí por ocho pequeños especímenes de* Neusticosaurus. *Medía 2,3 metros. Fue el notosaurio mejor adaptado para la vida en el agua. Sus extremidades funcionaban a modo de paletas; su cola, ancha y lateralmente aplanada, le permitía una mejor propulsión dentro del agua.*

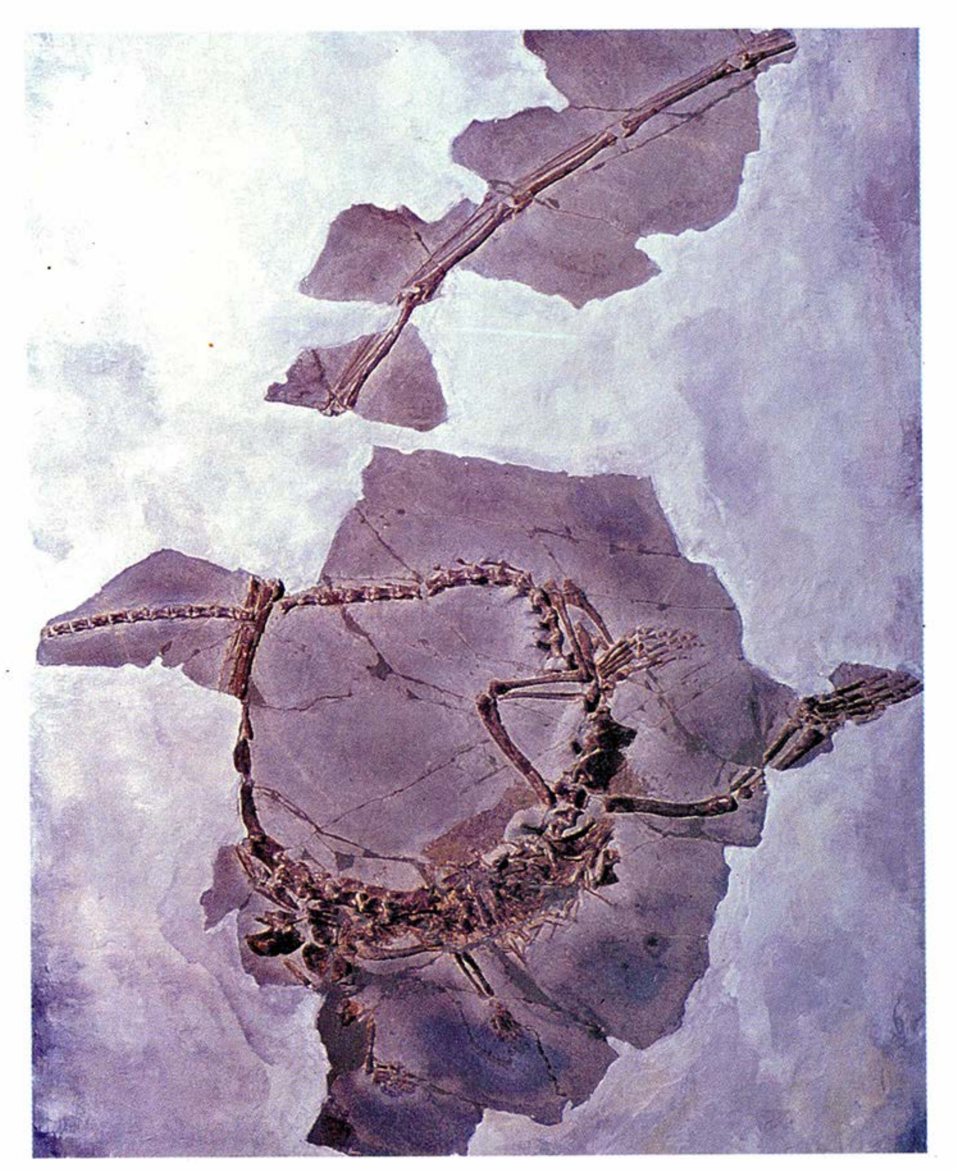
San Giorgio. El animal, que llegó a medir hasta 4,5 metros de la cabeza a la cola, se ha hecho famoso por su cuello absurdamente largo, con una longitud superior al doble de la del tronco. Nosotros hemos llegado a la conclusión de que debió tratarse de un animal acuático porque es imposible pensar que pudiese soportar el peso de su cuello de haber vivido en tierra.

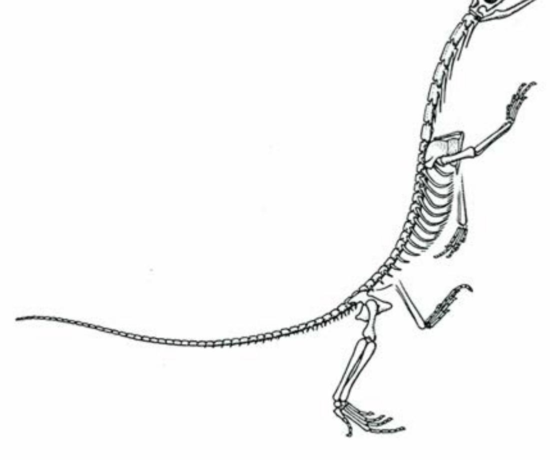
Estrechamente emparentado con *Tanystropheus* pero de talla mucho menor (no más de 80 centímetros de la cabeza a la cola) era *Macrocnemus*. Se le supone bastante móvil en tierra, donde perseguía insectos y los atrapaba con la boca. El gran número de ejemplares de diferente edad que se han hallado tanto de *Macrocnemus* como de *Tanystropheus* muestra que su cuello, enormemente alargado, fue el resultado de un crecimiento alométrico; es decir, el cuello se desarrollaba a un ritmo superior al del resto del cuerpo. Se hace difícil admitir que el exagerado cuello de *Tanystropheus* confiriera a su portador algún tipo de ventaja; nosotros creemos, por contra, que la especie sobrevivió durante varios millones de años, no gracias a su extraordinario cuello, sino a pesar de él.

El único arcosaurio verdadero (grupo al que pertenecen los dinosaurios) que se ha hallado en el yacimiento es *Ticinosuchus ferox*. Con longitud de unos 2,5 metros, se cree que era de vida terrestre y un carnívoro feroz.

Los talatosaurios, otro grupo enigmático de reptiles marinos, aparecen también en las pizarras de San Giorgio. Pertenecen a los Diapsida, grupo del cual descienden todos los reptiles actuales, excepto las tortugas. Los talatosaurios integran un conjunto de reptiles marinos mal conocidos. Se han descrito tres géneros del monte de San Giorgio: *Askeptosaurus*, un animal que se alimentaba de peces, medía unos 2,5 metros de longitud y tenía un cráneo largo y estrecho, *Clarazia*, de un metro aproximado de largo y provisto de dientes trituradores (necesarios para alimentarse, quizá, de moluscos) y *Hescheleria*, especimen incompleto cuya dieta y hábitos ignoramos.

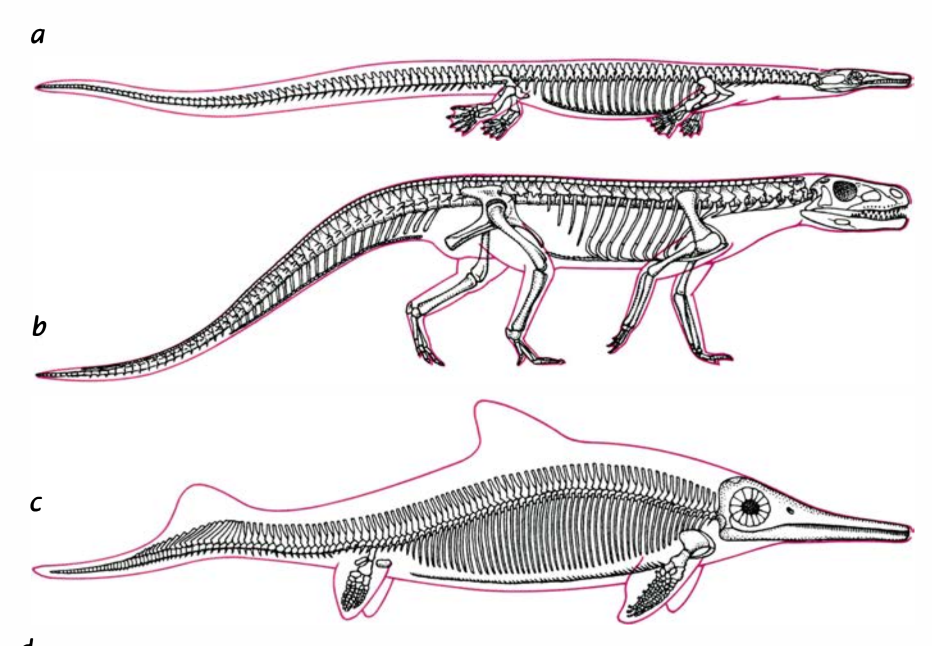
También habitaron la cuenca de San Giorgio los ictiosaurios, grupo de rep-





7. UN EXTRAÑO REPTIL de la cuenca de San Giorgio fue **Tanystropheus,** ***animal de 4,5 metros de largo cuyo cuello tenía dos veces la longitud del tronco. El peso relativo del cuello era tan grande que el animal probablemente sólo podía sostenerlo dentro del agua. Por esa razón se cree que la especie tuvo que ser acuática. La cabeza, que aunque falta en este fósil*** **(arriba)** ***y se conoce gracias a otros ejemplares, era notablemente pequeña en comparación con el resto del cuerpo*** **(abajo).** ***Emparentado con*** **Tanystropheus,** ***si bien de talla mucho menor, era*** **Macrocnemus** **(a la derecha),** ***un reptil altamente móvil que debía de pasar gran parte del tiempo en tierra y que incluso pudo haber adoptado una posición erguida mientras atrapaba insectos.***

tiles marinos con talla y forma similares a la de los modernos delfines. Estaban provistos de extremidades en forma de paleta y de unos peculiares hocicos. Abundantes y ampliamente distribuidos durante el Triásico, son, sin embargo, un grupo enigmático. Su relación con otros reptiles todavía es motivo de especulación. Se han hallado algunos ejemplares que contienen restos de embriones, por lo que se supone que los huevos debieron haberse desarrollado dentro del cuerpo de la madre y que las crías nacían vivas, una estrategia que parece claramente ventajosa para un reptil acuático incapaz de adentrarse en tierra firme para depositar sus huevos. Son tres los géneros de ictiosaurios recuperados: *Mixosaurus*, el más común y mejor conocido de los ictiosaurios triásicos, *Cymbospondylus* y quizá *Toretocnemus*.

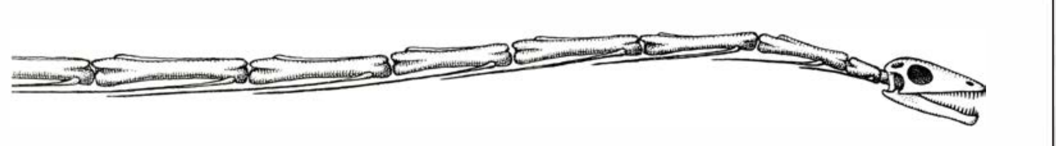




8. CONJUNTO DE FOSILES de San Giorgio. Entre ellos el talatosaurio **Askeptosaurus (a)**, *reptil marino de unos 2,5 metros de longitud que se alimentaba de peces;* **Ticinosuchus ferox (b)**, *una feroz especie terrestre que medía alrededor de 2,5 metros de largo y se hallaba emparentada con los verdaderos dinosaurios; y también ictiosaurios tales como este ejemplar adulto de* **Mixosaurus (c)**, *reptil marino de un metro de longitud que presenta una semejanza superficial con los delfines. Un examen minucioso revela que el ejemplar de mixosaurio* **(d)** *corresponde a una hembra preñada que llevaba en el interior del abdomen varios diminutos embriones.*

Resumiendo en pocas palabras lo que representan los fósiles del San Giorgio, se podría decir que ofrecen una visión excelente de una fauna ya extinguida. Sin embargo, las semejanzas anatómicas y los rasgos confusos que presentan muchos de los reptiles hacen que cueste situarlos en el marco de las clasificaciones actuales. La diversidad de los vertebrados fósiles de San Giorgio refuerza la impresión generalizada de que las relaciones entre los principales grupos de peces y reptiles son difíciles de desentrañar.

¿Por qué razón, dada la riqueza del material fósil, resulta tan aventurado establecer la evolución de los reptiles? ¿Débese a la falta de una definición precisa de los principales grupos? Y en este caso, ¿obedece ello a que los fenómenos de convergencia (el proceso evolutivo mediante el cual organismos no emparentados, pero que viven en hábitats similares, adquieren una semejanza superficial) abundan más de lo que se venía aceptando? ¿Resultan las semejanzas externas entre los animales de fuerzas estructurales desconocidas que determinaron su forma y tamaño? Las respuestas a estas cuestiones constituyen en la actualidad el objetivo de un intenso programa de investigación, que nos indica que la reconstrucción del pasado no va a ser una tarea cómoda. Pero un hecho, al menos, es cierto: los fósiles excelentemente conservados de San Giorgio han permitido a los paleontólogos plantearse cuestiones clave acerca de la naturaleza de la vida y el proceso de la evolución.



BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A NEW GENUS OF SHARK FROM THE MIDDLE TRIASSIC OF MONTE SAN GIORGIO, SWITZERLAND. O. Rieppel en *Paleontology*, vol. 25, n.º 2, págs. 399-412; 1982.

ALLOMETRY AND HETEROCHRONY IN THE GROWTH OF THE NECK OF TRIASSIC PROLACERTIFORM REPTILES. Karl Tschanz en *Paleontology*, vol. 31, n.º 4, págs. 997-1011; 1988.

A FOSSIL REPTILE EMBRYO FROM THE MIDDLE TRIASSIC OF THE ALPS. P. Martin Sander en *Science*, vol. 239, n.º 4841, págs. 780-783; 1988.

VERTEBRATE PALEONTOLOGY AND EVOLUTION. Robert L. Carroll. W. H. Freeman, 1988.

La transformación de Fourier

La doble hélice del ADN, el ciclo de las manchas solares y las señales aserradas que la electrónica utiliza se reducen matemáticamente a una serie de curvas ondulantes. Tal es la idea que subyace a una poderosa herramienta del análisis

Ronald L. Bracewell

Para calcular una transformada, escuche. El oído efectúa automáticamente el cálculo, un cálculo que el intelecto sólo alcanza a realizar tras años de formación matemática. El oído ejecuta la transformación convirtiendo el sonido —ondas de presión que viajan a través del tiempo y de la atmósfera— en un espectro, que es una descripción del sonido mediante una serie de volúmenes de diferentes tonos. El cerebro se encarga de convertir esa información en sonido percibido.

Resulta posible efectuar por métodos matemáticos operaciones similares sobre las ondas sonoras y, con mayor generalidad, sobre casi todo fenómeno fluctuante, desde las ondas luminosas, pasando por las mareas oceánicas, hasta los ciclos solares. Dichas herramientas matemáticas permiten descomponer las funciones que representan las fluctuaciones en un conjunto de componentes sinusoidales, curvas ondulantes que oscilan de un máximo a un mínimo y viceversa, a modo de crestas y senos de las ondas del océano. La transformación de Fourier es una función que describe la amplitud y la fase de cada sinusoide, con una frecuencia específica. (La amplitud expresa la altura de la sinusoide; la fase, el punto de arranque dentro del ciclo de la sinusoide.)

La transformación de Fourier ha llegado a ser un poderoso instrumento en diversos campos de la ciencia. En ciertos casos, proporciona métodos para la resolución de ecuaciones difíciles de manejar, verbigracia, las ecuaciones que describen las respuestas dinámicas de los sistemas eléctricos, térmicos o lumínicos. En otros casos, permite identificar las aportaciones de índole regular a una señal fluctuante, contribuyendo así a dar sentido a las observaciones de la astronomía, la medicina y la química.

RONALD L. BRACEWELL pertenece al claustro de la facultad de ingeniería eléctrica de la Universidad de Stanford desde 1955. Se formó en la Universidad de Sydney y en el laboratorio Cavendish, en Cambridge, donde se doctoró. Entre las materias que ha investigado se cuentan el radar de microondas, la física ionosférica y la radioastronomía. En Stanford, es catedrático emérito de informática y numerario del laboratorio del espacio, telecomunicaciones y radiociencia.

El mundo tuvo por vez primera noticia de esta técnica merced al matemático de quien la transformación recibe su nombre, el barón Jean-Baptiste-Joseph Fourier. No sentía por el calor mero interés: le obsesionaba. Mantenía su casa de Grenoble caldeada hasta el punto de resultar incómoda, de lo cual solían quejarse sus visitas. Y mientras, iba forrado en gruesas capas y abrigos. Quizá fuera el atractivo de climas más cálidos lo que, en 1798, indujo a Fourier a unirse a la comitiva de 165 sabios que acompañaron la expedición de Napoleón a Egipto.

Mientras Napoleón combatía a los sirios en Palestina, expulsaba de Egipto a los turcos y perseguía a Murad Bey, jefe de los mamelucos, los científicos franceses emprendieron ambiciosos estudios de geografía, arqueología, medicina, agricultura e historia natural. Fourier fue nombrado secretario del organismo científico conocido por Instituto de Egipto. Tal era su competencia en despachar tareas administrativas, que le fueron encomendadas no pocas misiones diplomáticas. Lo cual no le impidió llevar a cabo una exhaustiva investigación de las antigüedades egipcias y pergeñar una teoría sobre las raíces de las ecuaciones algebraicas.

Poco antes de que los franceses fueran arrojados de Egipto, en 1801, Fourier y sus colegas se hicieron a la mar para volver a Francia. El comandante de la Flota Británica, almirante Sir Sidney Smith, no tardó en apoderarse del navío y de su cargamento de documentos y reliquias egipcias. Con el honorable espíritu propio de la época, Smith desembarcó a los científicos sanos y salvos en Alejandría. El comandante inglés acabaría finalmente viajando a París para devolver el material confiscado, a excepción de la piedra Rosetta (la clave de los jeroglíficos egipcios), que se conserva todavía hoy en el Museo Británico, como monumento a la derrota militar de Napoleón y su contribución a la egiptología.

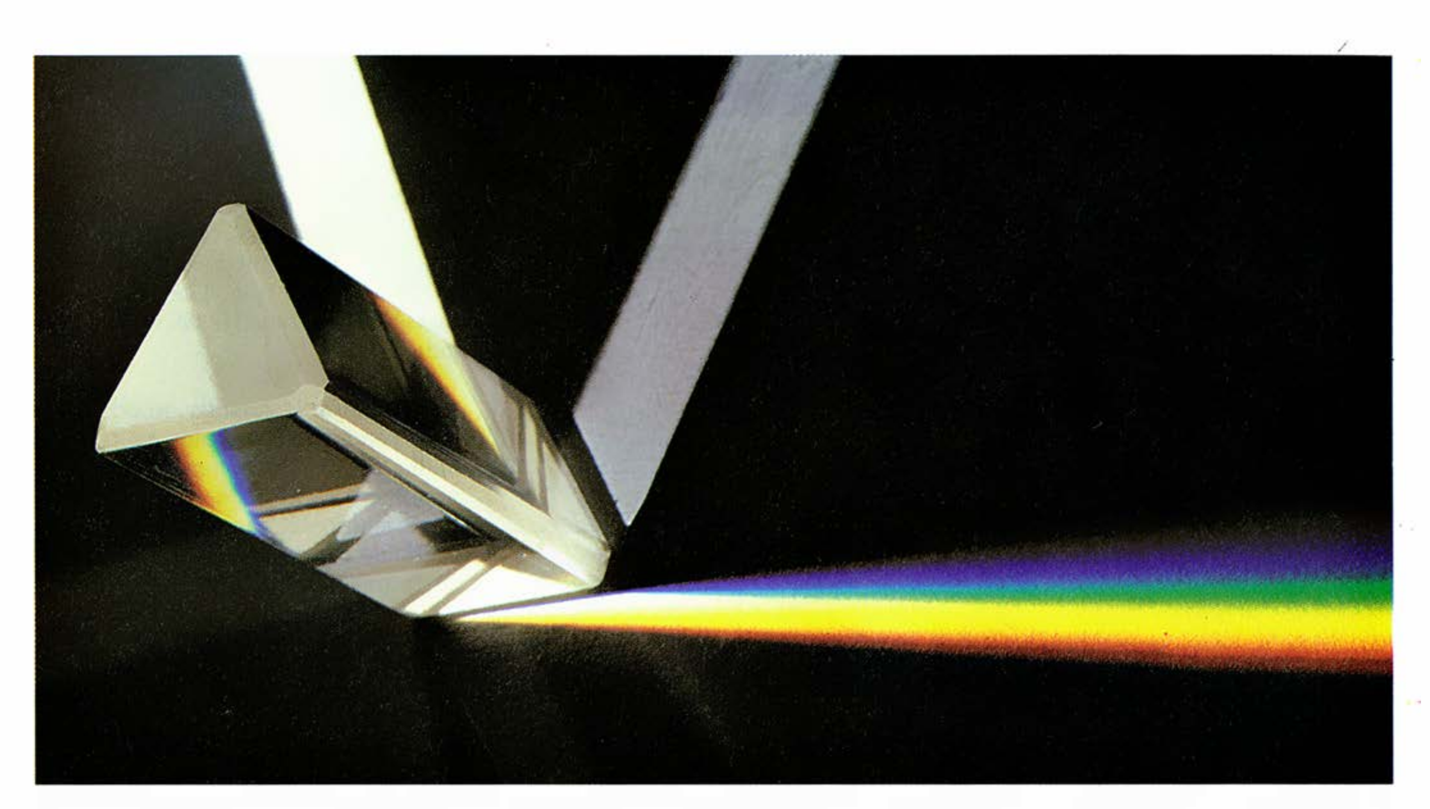
Tras retornar a Francia, relativamente indemne, Fourier se centró en cuestiones matemáticas, en su puesto de profesor de análisis de la Escuela Politécnica, aunque en 1802 volvió a entrar al servicio de Napoleón. Fourier se convirtió en prefecto del departamento de Isère. Mientras se esforzaba por remediar los desgarros originados en la Revolución de 1789, construyó el tramo francés de la carretera a Turín y desecó 80.000 kilómetros cuadrados de ciénagas que provocaban malaria endémica. Durante aquel tiempo, dedujo una ecuación que describía la conducción del calor en los cuerpos sólidos. Y hacia 1807, había inventado un método para resolver tal ecuación: la transformación de Fourier.

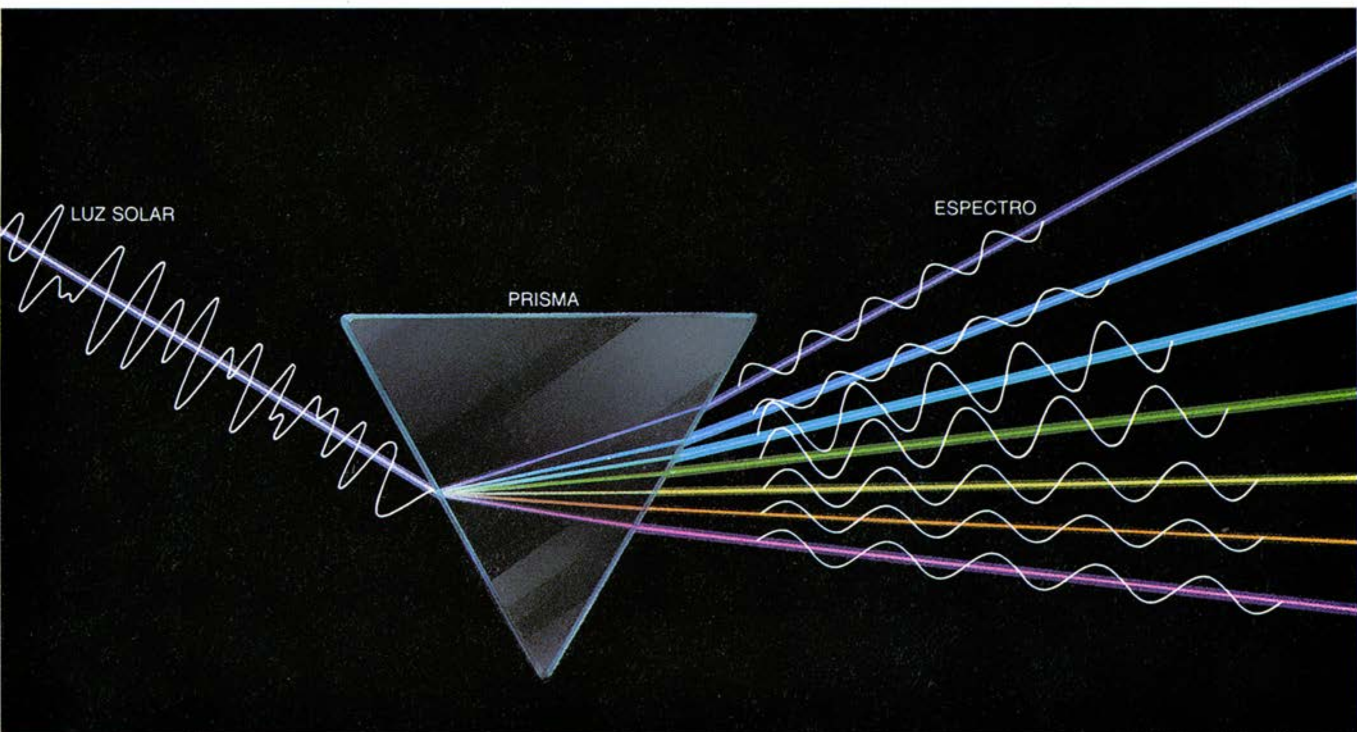
Se sirvió de su técnica matemática para explicar muchos ejemplos de conducción del calor. Tenemos uno particularmente instructivo, que evita las complicaciones del cálculo, en el flujo de calor en torno a un anillo de ancla —un anillo de hierro que sujeta el ancla de un barco a su cadena— introducido a medias en un fuego. Cuando parte de la circunferencia se pone al rojo vivo, se retira el anillo del fuego y, antes de que haya podido perder mucho calor en el aire, el anillo se entierra en arena refractaria fina y se mide la temperatura en torno a la curva exterior [*véase la figura 2*].

La distribución de temperatura es,

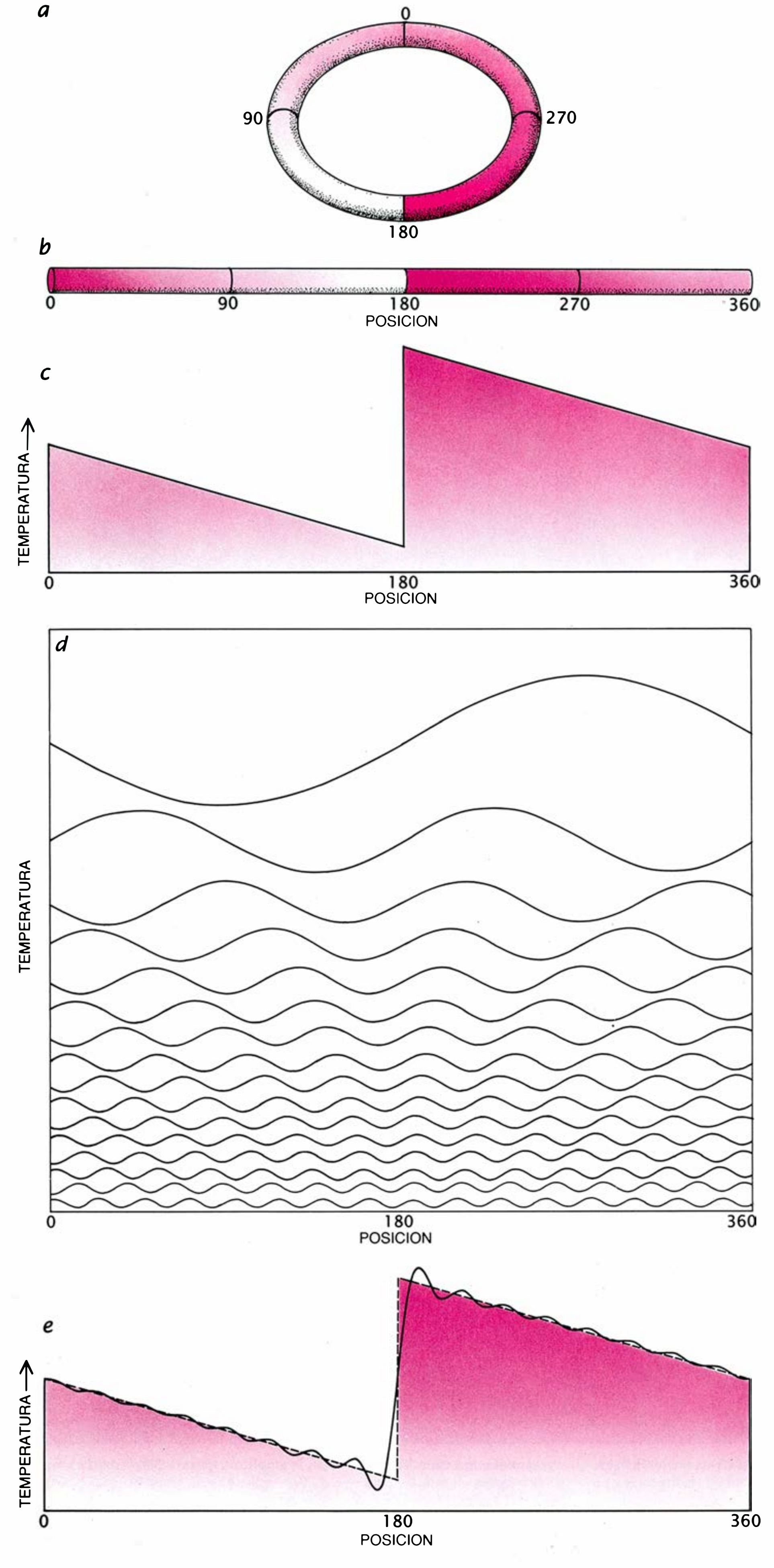
en un comienzo, irregular: parte del anillo se encuentra uniformemente frío y parte, uniformemente caliente; en la zona media, la temperatura cambia con brusquedad. Sin embargo, debido a la transmisión de calor desde la parte caliente hacia la fría, la distribución de temperaturas comienza a suavizarse. La distribución de temperaturas en torno al anillo alcanza pronto una forma sinusoidal; al representar gráficamente la temperatura, vemos una curva que sube y baja suavemente, a modo de una S, de forma exactamente igual a la de variación de las funciones seno y coseno. La sinusoide se va aplanando gradualmente, hasta que todo el anillo llega a una temperatura constante.

Fourier propuso que la irregular distribución inicial podía descomponerse en multitud de sinusoides simples, provista cada una con su propia temperatura máxima y su propia fase, esto es, su posición relativa dentro del anillo.





1. EN EL ESPECTRO de un haz de luz solar encontramos una analogía física de las transformaciones matemáticas (*arriba*). La intensidad de la luz solar que penetra en el prisma varía de un instante a otro (*abajo*). La luz saliente del prisma se ha separado y descompuesto, y atraviesa el espacio en colores puros, esto es, en frecuencias simples. La intensidad de cada color equivale a la amplitud correspondiente a cada frecuencia. Así, la amplitud, que era función del tiempo, se trasforma en una función que da la amplitud correspondiente a cada frecuencia. La transformada de Fourier permite representar una señal que varía en el tiempo como una función de la frecuencia y la amplitud; facilita, además, información sobre la fase. (Otras aplicaciones de interés se dan en biología.)

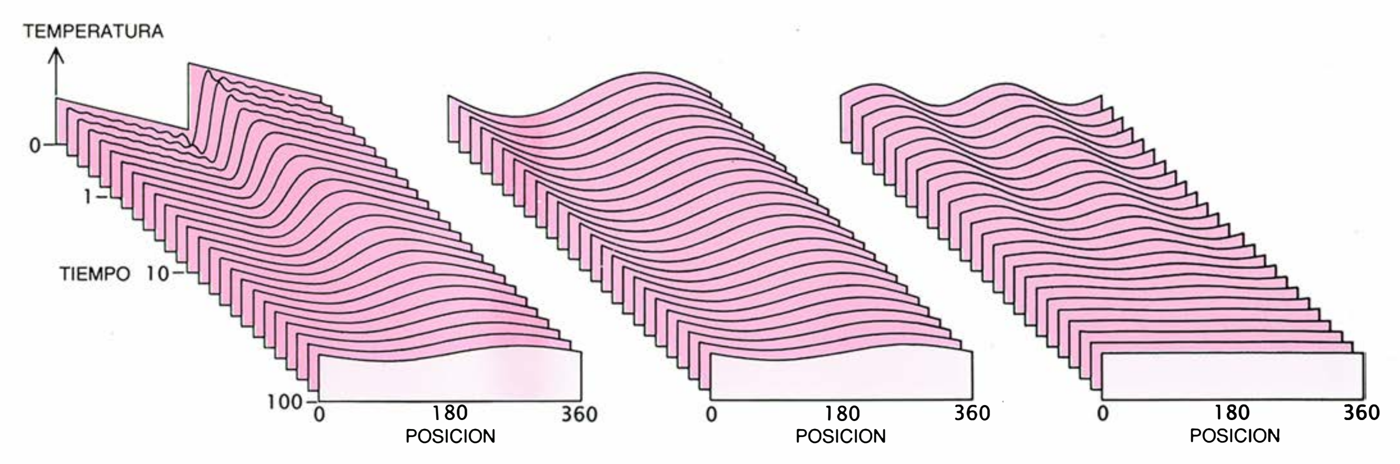


Además, cada componente sinusoidal variaba un número entero de veces de un máximo a un mínimo e inversamente en cada vuelta completa en torno al anillo. La variación que poseía un solo ciclo dio en llamarse armónico fundamental, mientras que las variaciones con dos, tres o más ciclos por giro en torno al anillo son el segundo armónico, el tercer armónico, etcétera. La función matemática que describe la temperatura máxima y la posición —la fase— de cada uno de los armónicos es la transformada de Fourier de la distribución de temperaturas. Fourier había cambiado una distribución única, cuya descripción matemática era difícil, por una serie más manejable de funciones trigonométricas periódicas que, al sumarse, engendraban la distribución original.

Al aplicar el análisis anterior a la conducción de calor en torno al anillo, razonó que, cuanto mayor fuera el número de períodos de una componente sinusoidal, tanto más deprisa decaería tal componente. Podemos seguir su razonamiento examinando la relación entre el armónico fundamental y el segundo armónico de la distribución de temperaturas. La temperatura del segundo armónico varía dos veces de caliente a fría al ir recorriendo la circunferencia del anillo, mientras que la del armónico fundamental lo hace solamente una vez. Así, pues, la distancia que debe viajar el calor desde la cresta térmica hasta el valle frío es, para el segundo armónico, la mitad sólo de la correspondiente al fundamental. Además, el gradiente de temperatura es, en ese segundo armónico, el doble de abrupto que en la variación fundamental. Dado que un flujo calorífico doble ocupa la mitad de la distancia, el segundo armónico se extinguirá cuatro veces antes que el fundamental.

Los armónicos de órdenes superiores se amortiguarán con mayor celeridad aún. Por tanto, al tender al equilibrio la temperatura en el anillo, tan sólo persistirá una variación sinusoidal, la

2. TEMPERATURA de los distintos puntos de un anillo de hierro. Fue éste uno de los primeros fenómenos analizados mediante la técnica de Fourier. Vemos en (*a*) una distribución de calor en torno a un anillo; la temperatura es más elevada cuanto más intenso es el color. Para comenzar el análisis, el anillo se "desarrolla" (*b*) y se mide su temperatura en cada punto, lo cual nos proporciona una distribución de temperatura en torno a la circunferencia (*c*). La distribución de temperatura se descompone entonces en multitud de curvas sinusoidales con uno, dos, tres o más ciclos (*d*). Si luego nos limitamos a sumar dieciséis de estas curvas (*línea continua en e*), se obtiene una buena aproximación de la primitiva distribución de temperaturas (*línea de trazos en e*).



3. CONDUCCION DE CALOR a través de un anillo de hierro. Provoca que la distribución de temperaturas cambie con el tiempo (*izquierda*). Al igual que la distribución de temperatura puede ser descrita mediante una serie de curvas sinusoidales, la evolución temporal de una distribución de temperatura puede quedar descrita mediante cambios en las sinusoides. Vemos aquí la distribución monocíclica, llamada primer armónico (*centro*), y la distribución de dos ciclos, o segundo (*derecha*). Fourier estableció que el segundo armónico se amortigua cuatro veces más rápidamente que el primero, y que los armónicos de orden superior decaen antes aún. Dado que el primer armónico es el de más larga persistencia, la distribución general tiende hacia la forma sinusoidal del mismo.

correspondiente al armónico fundamental. Fourier estaba convencido de que la evolución temporal de cualquier distribución calórica inicial podría calcularse merced a su técnica.

El análisis de Fourier ponía en entredicho ciertas concepciones matemáticas por las que sus contemporáneos sentían inquebrantable adhesión. A principios del siglo XIX, a muchos de los más distinguidos matemáticos parisienses —entre ellos Lagrange, Laplace, Legendre, Biot y Poisson— les resultaba imposible aceptar la tesis de Fourier, que sostenía que la distribución de temperaturas podía descomponerse en una sencilla suma aritmética, compuesta por una variación fundamental más sus armónicas de frecuencias más elevadas. También Leonhard Euler hubiera hallado incorrectas las ideas de Fourier, no obstante haber él mismo propuesto que ciertas funciones eran representables mediante sumas de funciones sinusoidales. Y así, cuando Fourier defendió esa tesis en una sesión de la Academia Francesa de Ciencias, Lagrange, puesto en pie, sostuvo que aquello era imposible.

Mas ni siquiera en esas circunstancias podía la Academia ignorar la importancia de los resultados de Fourier; le concedió un premio por su teoría matemática de las leyes de propagación del calor y la concordancia de los resultados de su teoría con experimentos cuidadosamente realizados. A pesar de todo, la concesión del premio se anunció con la siguiente reserva: "La novedad del tema, sumada a su importancia, nos ha decidido a otorgarle el premio, haciendo notar, empero, que el modo en que el autor llega a sus ecuaciones no carece de dificultades, y que el análisis que efectúa para integrarlas deja todavía algo que desear, tanto en lo tocante a generalidad como en lo concerniente al rigor".

La gran desconfianza con que los colegas de Fourier consideraban el trabajo de éste fue la causa de que su publicación se demorase hasta 1815. De hecho, el trabajo no quedó plenamente descrito hasta la publicación, en 1822, de su libro *Théorie analytique de la chaleur* (Teoría analítica del calor).

Las objeciones al método de Fourier se centraban en su proposición de que una función en apariencia discontinua pudiera representarse mediante una suma de funciones sinusoidales, todas ellas continuas. Las gráficas de las funciones discontinuas presentan saltos o rupturas. Por ejemplo, la función llamada de Heaviside tiene el valor cero en toda su porción izquierda y salta bruscamente a 1 en su mitad derecha. (Tal función puede describir la intensidad en un circuito eléctrico antes y después del cierre de un interruptor.) Los coetáneos de Fourier jamás habían visto que una función discontinua estuviese descrita por una combinación de funciones continuas ordinarias, como las funciones lineales, cuadráticas, exponenciales o sinusoidales. Sin embargo, de estar Fourier en lo cierto, la suma de un número infinito de sinusoides podría ser convergente y representar, con exactitud, funciones cuyos valores saltasen bruscamente, y no sólo una, sino muchas veces. En su época, tal idea parecía manifiestamente absurda.

A pesar de las citadas objeciones, muchos investigadores, entre ellos la matemática Sophie Germain y el ingeniero Claude Navier, comenzaron a generalizar el trabajo de Fourier, extrapolándolo a campos distintos del análisis del calor. Pero los matemáticos seguían dándole vueltas al problema de si una serie de funciones sinusoidales podría converger y representar con exactitud una función discontinua dada.

Siempre que es preciso sumar una serie infinita de números, se plantea la cuestión de la convergencia. Tomemos un ejemplo clásico: ¿podremos llegar a una pared si en cada paso avanzamos la mitad de la distancia que nos separa de ella? El primer paso llevará la punta de nuestro pie hasta la marca de mitad del camino; el segundo, hasta las tres cuartas partes; al final del quinto llevaremos andado casi el 97 por ciento del camino. Cierto es que estamos a punto de alcanzar el muro; pero también lo es que, sea cual fuere el número de pasos que demos, nunca llegaremos a alcanzarlo del todo. Podemos demostrar matemáticamente, eso sí, que podríamos acercarnos a la pared hasta quedar de ella a menor distancia que cualquiera que se estipule de antemano. (La demostración equivale a demostrar que la suma de un medio, más un cuarto, más un octavo, más un dieciseisavo, y así sucesivamente, tiende a uno.)

La cuestión de la convergencia de las series de Fourier volvió a surgir en las postrimerías del siglo XIX, en las tentativas por predecir el flujo y reflujo de las mareas. Lord Kelvin había inventado un ordenador analógico destinado a proporcionar información sobre mareas a las tripulaciones de los navíos mercantes y de la armada. Los primeros conjuntos de amplitudes y fases fueron calculados manualmente, a partir de un registro de alturas de las mareas y de los tiempos correspondientes,

cuidadosamente medidos a lo largo de un año en un puerto determinado.

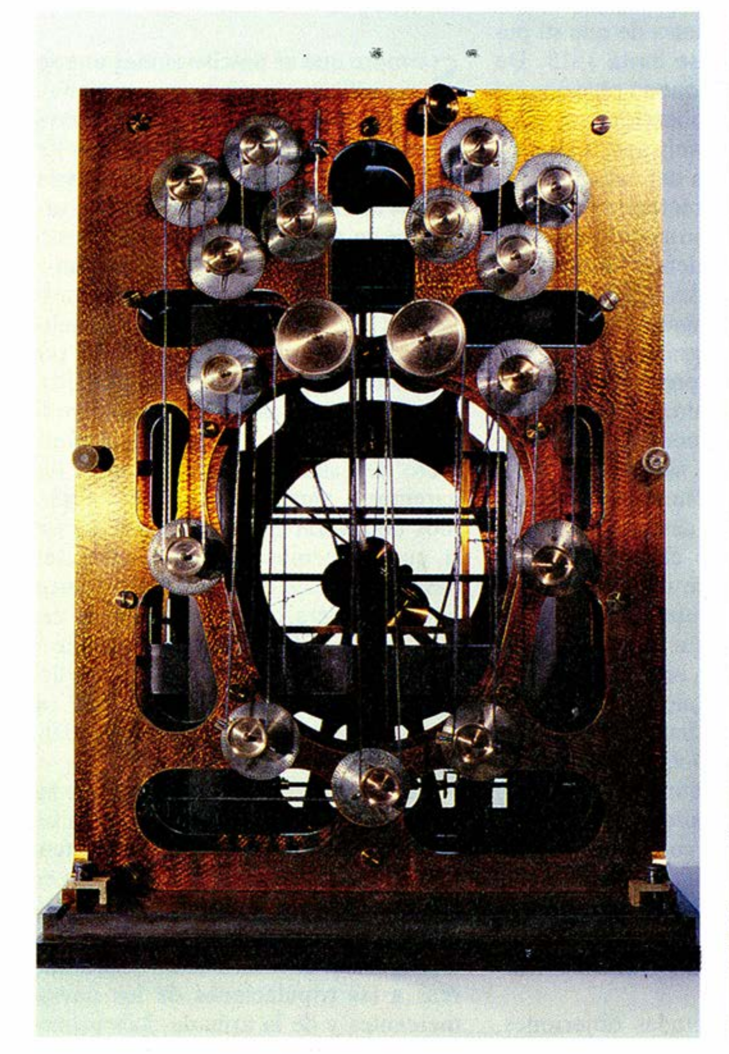
Cada amplitud y fase representaba una componente sinusoidal de la función que daba la altura de la marea en función del tiempo y ponía de manifiesto una de las contribuciones periódicas a la marea. Los resultados se suministraban entonces al ordenador de Lord Kelvin, y el ingenio sintetizaba una curva que predecía las alturas de la marea correspondientes al año siguiente. Pronto se generaron curvas de mareas para puertos de todo el mundo.

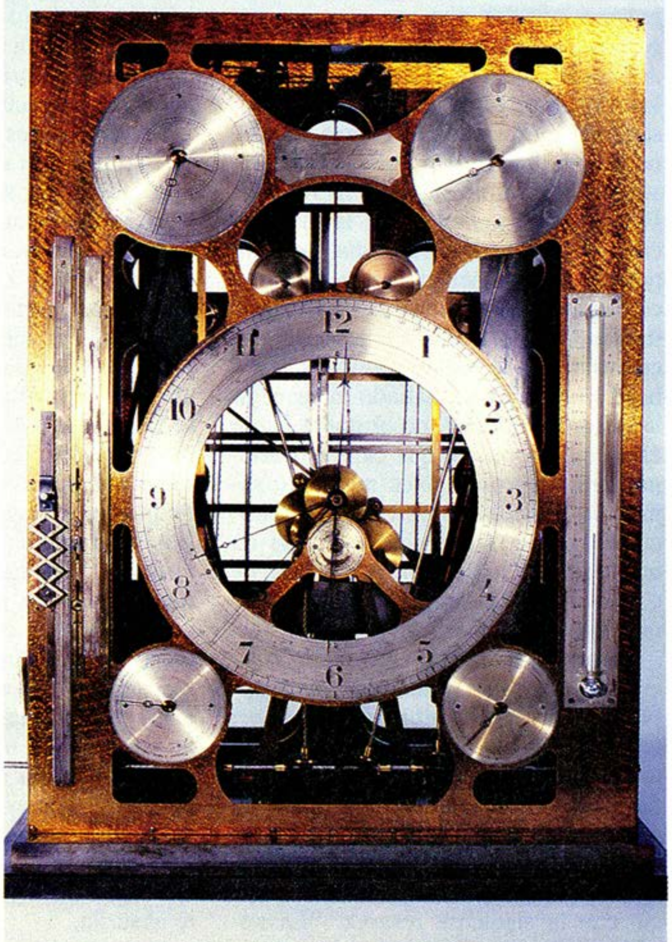
Parecía evidente que una máquina de predicción de mareas compuesta por mayor número de elementos podría calcular más amplitudes y más fases y proporcionar así mejores predicciones. Tal presunción resultó no ser completamente cierta cuando la función de alturas de mareas a sintetizar contenía un salto brusco, esto es, describía una función discontinua.

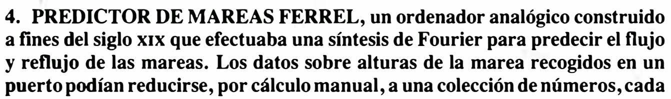
Supongamos que tal función fuese reducida a un pequeño conjunto de amplitudes y fases, esto es, a unos pocos coeficientes de Fourier. La función original puede reconstruirse entonces a partir de las componentes sinusoidales asociadas a esos coeficientes, pudiéndose medir en cada punto la discrepancia o error entre la función original y la reconstruida. Se repite el procedimiento de detección de errores, calculando cada vez un número mayor de coeficientes, incorporándolos a la reconstrucción. En cada caso, el valor del error máximo no disminuye. Por otra parte, el error llega a quedar confinado a la región de la curva situada en las inmediaciones de la discontinuidad, por lo que en cualquier punto dado el error acababa por tender a cero. En 1899, Josiah Willard Gibbs, de la Universidad de Yale, confirmó teóricamente dicho resultado.

El análisis de Fourier no se puede aplicar todavía a funciones muy insólitas, como las que poseen, en un intervalo finito, un número infinito de discontinuidades con salto infinito. Empero, en condiciones muy generales, una serie de Fourier será convergente cuando su función original provenga de la medición de una magnitud física.

Se han desarrollado vastas áreas de nuevas matemáticas a partir de la investigación de la convergencia de la serie de Fourier de funciones concretas. Tenemos un ejemplo en la teoría de funciones generalizadas, que se asocia a los nombres del inglés George F. J. Temple, del polaco Jan G. Mikusinski y del francés Laurent Schwartz. La teoría estableció en 1945 bases firmes para el tratamiento de la función escalonada de Heaviside y para la función delta de Dirac; esta última describe una unidad de área concentrada en un punto. La teoría permitió aplicar la transformación de Fourier a la resolución de ecuaciones basadas en nociones intuitivas aceptadas; verbigracia: masas puntua-






4. PREDICTOR DE MAREAS FERREL, un ordenador analógico construido a fines del siglo XIX que efectuaba una síntesis de Fourier para predecir el flujo y reflujo de las mareas. Los datos sobre alturas de la marea recogidos en un puerto podían reducirse, por cálculo manual, a una colección de números, cada uno de los cuales representaba una contribución periódica a la marea. Los valores correspondientes a un puerto se introducían en el predictor ajustando unos mandos giratorios en el dorso de la máquina (*izquierda*). Al colocar una hora en el frente de la máquina (*derecha*), la altura de la marea se leía en un dial.

les, cargas puntuales, dipolos magnéticos y la concentración de una carga sobre una viga.

Después de casi dos siglos de desarrollo, la teoría subyacente a la transformación de Fourier ha quedado sólidamente establecida y explicada. Como hemos visto, el análisis de Fourier descompone una función del espacio o del tiempo en componentes sinusoidales de frecuencias, amplitudes y fases variables. La transformada de Fourier es una función que representa la amplitud y fase correspondiente a cada frecuencia. Disponemos de dos métodos matemáticos diferentes para deducir la transformada, aplicable uno cuando la función original es continua y el otro cuando consiste en una multitud de mediciones discretas.

Cuando la función se obtiene de una lista de valores tomados a intervalos discretos, es posible descomponerla en una serie de funciones sinusoidales de frecuencias discretas, que parten de una frecuencia mínima, la fundamental, y pasan por una serie de frecuencias que son dos, tres o más veces la fundamental. Esta suma de sinusoides recibe el nombre de serie de Fourier.

Si la función original proporciona un valor para cada número real, se la descompone en funciones sinusoidales de todas las frecuencias, combinadas mediante una operación conocida por integral de Fourier. La transformada de Fourier de la función original no es ni la serie ni la integral. En el caso de la función discreta, es la lista de amplitudes y fases dependientes de la frecuencia que aparecen en la serie de Fourier; en el caso de la función definida de forma continua, la transformada es la función de la frecuencia resultante de evaluar la integral de Fourier.

Con independencia del método por el que vaya a deducirse la transformada, es necesario especificar dos números para cada frecuencia. Estos podrían ser la amplitud y la fase; no obstante, la misma información podría estar codificada en otros pares de números. Tales valores podrían expresarse mediante un solo número complejo. (Un número complejo es la suma de un número real y de otro número real multiplicado por la raíz cuadrada de -1.) Esta representación es muy popular, porque invita a utilizar el álgebra de los números complejos. Las funciones de variable compleja y la transformación de Fourier se han convertido en instrumentos indispensables para los cálculos numéricos necesarios en el diseño de circuitos eléctricos, el análisis de las vibraciones mecánicas y el estudio de la propagación de ondas.

La representación de una función dada por medio de su transformada de Fourier compleja proporciona cierto número de ventajas para el cálculo. Un problema típico es conocer con seguridad qué intensidad de corriente fluye cuando se le aplica a un circuito una tensión eléctrica conocida. El método directo requiere la resolución de una ecuación diferencial que relaciona entre sí las funciones que describen a la tensión y la intensidad. En cambio, las transformadas de Fourier de dichas funciones pueden relacionarse por una ecuación cuya solución es trivial.

En nuestros días, el estudio de las transformadas de Fourier consiste, en gran medida, en la adquisición de técnicas que permitan moverse libremente entre las funciones y sus transformadas. Es posible aplicar métodos analíticos para evaluar la integral de Fourier y obtener la transformada. Aunque tales métodos pudieran resultar difíciles a los no especialistas, son muchas las integrales de Fourier que ya se han calculado y tabulado y pueden verse en obras de referencia. Estos métodos se enriquecen con un puñado de teoremas atinentes a las transformadas. Con ayuda de dichos teoremas, se nos faculta para manipular formas de onda más o menos complicadas por reducción a componentes más sencillas.

Por fortuna, se dispone de métodos numéricos para calcular las transformadas de Fourier de funciones cuyas formas se basen en datos experimentales, o cuyas integrales de Fourier no sean fáciles de calcular analíticamente, o no figuren en las tablas. Antes de los ordenadores electrónicos, la computación numérica de una transformada era bastante tediosa, porque exigía un elevado número de operaciones aritméticas que era preciso realizar con lápiz y papel. Era posible reducir un poco el tiempo preciso mediante formularios y plantillas que orientaban a los investigadores al efectuar sus cálculos; aún así, la tarea que suponía podía todavía ser apabullante.

El número exacto de operaciones aritméticas que era preciso efectuar dependía del número de datos necesarios para describir la onda. El número de adiciones era comparable al número de datos, y el número de multiplicaciones, igual al cuadrado del número de datos. Por ejemplo, el análisis de una onda especificada mediante mil datos tomados a intervalos regulares requería del orden de mil operaciones de adición y exactamente un millón de multiplicaciones.

Tales cálculos resultaron progresivamente más factibles conforme se fueron desarrollando ordenadores y programas capaces de llevar a la práctica nuevos métodos de análisis de Fourier. Uno de ellos fue el elaborado, en 1965, por James W. Cooley, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la empresa IBM, y por John W. Tukey, de los Laboratorios Bell. El trabajo de ambos dio lugar a un programa conocido por transformación rápida de Fourier.

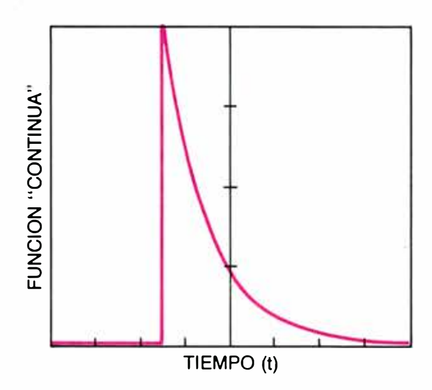
La transformación rápida logra economizar tiempo reduciendo el número de multiplicaciones necesarias para analizar una curva. La razón de que se hiciera hincapié en el número de multiplicaciones se debió a que, en esa época, la multiplicación constituía una operación lenta en comparación con otras de las operaciones del ordenador, como la adición o la búsqueda y almacenamiento de datos.

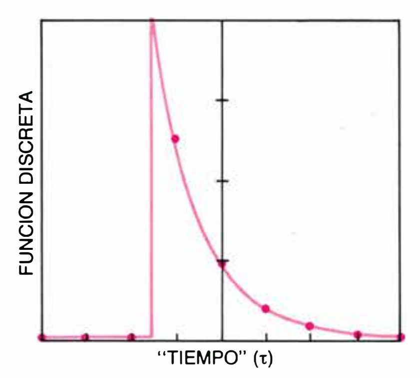
La transformación rápida de Fourier divide una curva en un gran número de muestras equidistantes. El número de multiplicaciones necesarias para analizar una curva se reduce a la mitad cuando el número de muestras se divide por dos. Por ejemplo, si en una curva se hubieran tomado 16 muestras, harían falta normalmente 162 = 256 multiplicaciones. Supongamos ahora que la curva se dividiera en dos piezas de ocho puntos cada una. El número de multiplicaciones necesarias para analizar cada segmento sería de 8 al cuadrado, o sea, 64. El total correspondiente a los dos segmentos es 128, la mitad del número de multiplicaciones requerido antes.

Si al dividir por dos la secuencia dada se logra una ganancia doble, ¿por qué no insistir en la estrategia? Por subdivisión reiterada obtenemos ocho piezas irreducibles de dos puntos cada una. Las transformadas de Fourier de estas piezas bipuntuales pueden computarse sin efectuar multiplicación alguna, pero sí hacen falta multiplicaciones en el proceso de combinación de las transformadas bipuntuales para construir la transformación completa. Se combinan primero ocho transformadas bipuntuales y se forman cuatro transformadas de cuatro puntos, dos transformadas octopuntuales después y, finalmente, la transformada de dieciséis puntos requerida. Las tres etapas de combinación de las piezas exigen 16 multiplicaciones cada una; por tal motivo, el

TRANSFORMACIONES DE FOURIER Y HARTLEY

Las tranformaciones de Fourier y de Hartley convierten funciones cuya variable es el tiempo en funciones de la frecuencia, que codifican información relativa a amplitudes y fases. Las gráficas que damos seguidamente representan la función "continua" $g(t)$ y la función discreta $g(\tau)$, donde t es el tiempo y τ es un número designado en cada punto-dato.





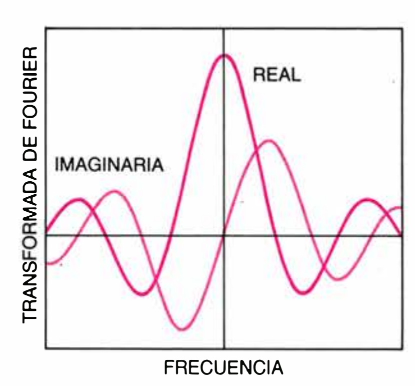
Ambas funciones parten de cero, saltan a un valor positivo y decaen después exponencialmente. La definición de transformada de Fourier de la función continua es una integral impropia, $F(t)$, mientras que la definición para una función discreta es una suma finita, $F(\nu)$.

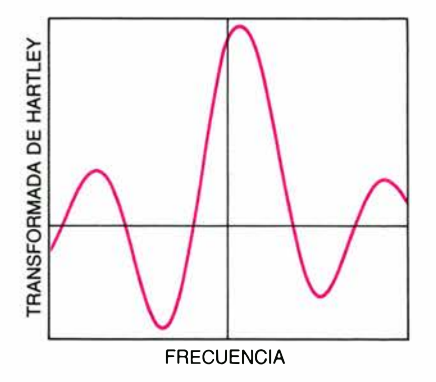
$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)\,(\cos\ 2\pi ft - i \operatorname{sen} 2\pi ft)\ dt \qquad F(\nu) = \frac{1}{n}\sum_{\tau=0}^{n-1} g(t)\,(\cos\ 2\pi\nu\tau - i \operatorname{sen} 2\pi\nu\tau)$$

En esta fórmula, f es la frecuencia, ν está relacionada con la frecuencia, n es el número total de muestras e i es la unidad imaginaria, cuyo cuadrado es -1. La representación integral resulta más adecuada para manipulaciones teóricas, mientras que la representación mediante sumas finitas se presta más a las aplicaciones de cómputo en ordenador. La transformada de Hartley y la transformada discreta de Hartley tienen definiciones similares.

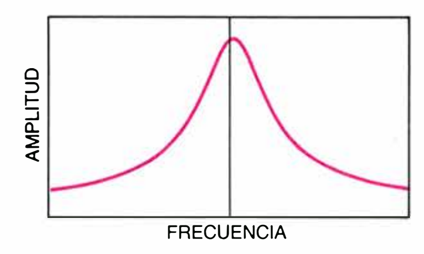
$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)\,(\cos\ 2\pi ft + \operatorname{sen} 2\pi ft)\ dt \qquad H(\nu) = \frac{1}{n}\sum_{\tau=0}^{n-1} g(t)\,(\cos\ 2\pi\nu\tau + \operatorname{sen} 2\pi\nu\tau)$$

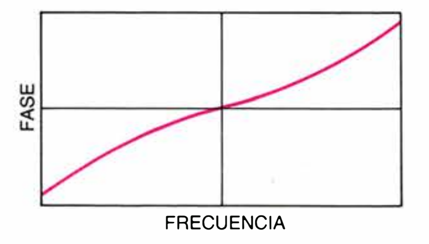
A pesar de que la única diferencia notacional entre las definiciones de Fourier y de Hartley es el factor $-i$ antepuesto a la función seno, una y otra transformadas son totalmente diferentes, pues la de Fourier consta de parte real e imaginaria, mientras que la de Hartley es enteramente real. Las transformadas discretas de Fourier y de Hartley tienen esencialmente la misma forma que sus análogas continuas.





Aunque las gráficas parezcan muy diferentes, la información sobre amplitud y fase que pueden extraerse de una y otra es la misma, como vemos al pie.





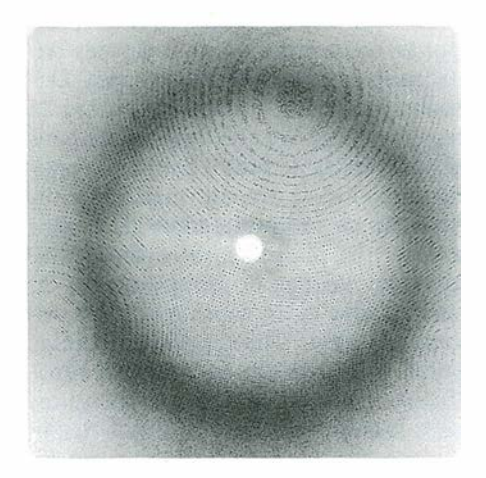
La amplitud de Fourier es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las partes real e imaginaria. La amplitud de Hartley es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de $H(-\nu)$ y $H(\nu)$. La fase de Fourier es el arco tangente del cociente de la parte imaginaria entre la real, mientras que la fase de Hartley se obtiene sumando 45° al arco tangente del cociente de $H(\nu)$ y $H(\nu)$.

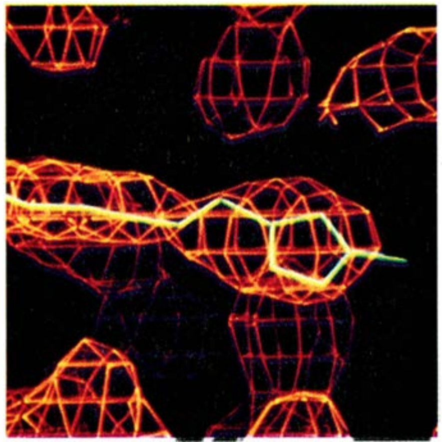
número total de multiplicaciones será de 48, o sea, 3/16 de las 256 primitivas.

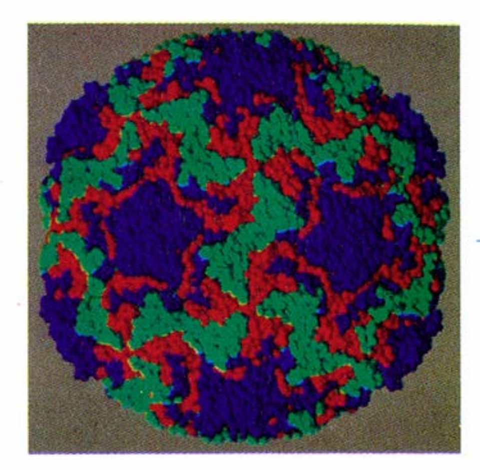
Podemos seguir la pista de esta estrategia encaminada a reducir el número de cómputos necesarios hasta tiempos muy anteriores al trabajo de Cooley y Tukey, concretamente, hasta los trabajos astronómicos de Carl Friedrich Gauss. Quería éste calcular órbitas de asteroides y cometas a partir de un número pequeño de observaciones. Tras descubrir una solución, halló también una forma de reducir la complejidad del cálculo, basada en principios similares a los de la transformada rápida de Fourier. En un artículo de 1805, donde describía su trabajo, Gauss escribía: "La experiencia enseñará al usuario que este método reduce grandemente el tedio de los cálculos mecánicos". Como vemos, el problema planteado por el movimiento de los cuerpos celestes no sólo nos proporcionó el cálculo diferencial y las tres leyes del movimiento, sino que estimuló también el descubrimiento de una moderna herramienta de cómputo.

Físicos e ingenieros, indoctrinados con el álgebra de los números complejos desde los primeros años de su formación, encuentran de su gusto la representación de sinusoides. La comodidad que supone la representación de la transformada de Fourier mediante una función compleja nos permite olvidar que las componentes sinusoidales subyacentes a ella son reales, y no necesariamente complejas. Este hábito mental ha oscurecido la importancia de una transformación similar a la de Fourier, concebida, en 1942, por Ralph V. L. Hartley, y ha retardado su adopción.

Hartley, que trabajaba en los laboratorios de investigación de la compañía Western Electric, dirigió los primeros trabajos de desarrollo de receptores de radio destinados a un radioteléfono transatlántico. Inventó el circuito oscilante que lleva su nombre. Durante la primera guerra mundial, investigó la forma en que el oyente, por medio de mecanismos auditivos y cerebrales, percibe la dirección de la que emana un sonido. Después de la guerra, trabajando en los Laboratorios Bell, Hartley formuló un importante principio de la tecnología de información, que enuncia que la cantidad total de información que un sistema puede transmitir es proporcional al producto de la banda de frecuencias que el sistema transmite por el tiempo durante el cual el sistema está disponible para







5. PERMITE EL ANALISIS DE FOURIER transformar pautas de difracción de rayos X en modelos moleculares. Los rayos X dispersados por los electrones de un virus, por ejemplo, generan configuraciones geométricas sobre una película fotográfica (*izquierda*). Tales configuraciones representan parte de la transformada de Fourier de la estructura molecular del virus. Invirtiendo el proceso de transformación, se deduce la distribución de los electrones y, en consecuencia, la disposición de los átomos (*centro*). A partir de estas distribuciones se elaboran modelos del virus (*derecha*). Los colores representan proteínas.

transmitir. En 1929 renunció a la dirección de su grupo, por enfermedad. Cuando su salud mejoró, se consagró a los estudios teóricos que condujeron a la transformación de Hartley.

Esta proporciona una posibilidad alternativa para analizar mediante sinusoides una función dada. Se diferencia de la transformación de Fourier en algo bastante sencillo. Mientras en la transformación de Fourier intervienen números reales e imaginarios y una suma compleja de funciones sinusoidales, en la de Hartley aparecen solamente números reales y una suma real de funciones sinusoidales.

En 1984, el autor de este artículo desarrolló un algoritmo destinado a efectuar la transformación rápida de Hartley. Medida en tiempo de cómputo, la diferencia entre las transformadas rápidas de Fourier y de Hartley depende del ordenador, del lenguaje de programación utilizado y del estilo de programación. Si dichos factores se mantienen constantes y no se cometen deslices en la programación, los programas para la transformada rápida de Hartley operan más velozmente que los de transformación rápida de Fourier. Aunque ambos programas requieren el mismo tiempo para recuperar los datos, proporcionar las funciones trigonométricas y llevar a cabo otras operaciones preliminares, el tiempo invertido en la ejecución de las etapas correspondientes a la transformación de Hartley es la mitad del requerido por la de Fourier.

Sin embargo, no estaba claro al principio que una transformada de Hartley proporcionase la misma información que una de Fourier. En consecuencia, cuando se confeccionaron los primeros programas destinados al cálculo de la transformación de Hartley, se introdujo una etapa más, con el fin de convertirla a la forma de Fourier, más conocida. Empero, quienes trabajaban con ella cayeron pronto en la cuenta de que resultaba posible deducir directamente, de la transformación de Hartley, las intensidades y las fases, sin necesidad del paso adicional. Un poco más de reflexión hizo ver que cada uno de los dos tipos de transformada proporciona, para cada frecuencia, un par de números que representan en amplitud y fase una oscilación física.

No obstante, otra reserva que se oponía a la transformación de Hartley era que la transformación de Fourier describía los fenómenos físicos de modo más natural. Son muchos los fenómenos, como la respuesta de un sistema simple a las vibraciones, que se describen comúnmente por medio de una suma compleja de funciones senoidales, algo que viene a ser el marchamo de la transformación de Fourier. Podría parecer, en consecuencia, que las transformadas de Fourier son más idóneas para describir el comportamiento de la naturaleza.

En realidad, tal conclusión es más un reflejo de la formación matemática que hemos recibido que de su naturaleza. Después de todo, cuando se procede a medir objetos físicos, los datos que proporcionan son números reales, no complejos.

El advenimiento de la transformación rápida de Hartley ha tornado obsoletas ciertas adaptaciones de la transformación rápida de Fourier, como las utilizadas para eliminar el ruido de la música registrada por medios digitales. Dichas adaptaciones requieren dos programas: uno de ellos transforma funciones reales para llevarlas al dominio complejo propio de la transformación de Fourier, mientras que el otro convierte funciones complejas del dominio de Fourier en funciones reales. El ruido de alta frecuencia de los discos de grabación digital puede eliminarse por filtrado de ciertas porciones de la transformada producida por el primer programa. El segundo programa reconvierte la transformada así alterada en una señal musical mejorada. Aunque individualmente estos ingeniosos programas funcionan a velocidades que rivalizan con la transformación rápida de Hartley, un único programa de Hartley basta tanto para transformar una función real en una transformada de Hartley como para reconvertir nuevamente la transformada en una función real, tras el filtrado deseado. Así, pues, no hace falta memoria extra para almacenar dos programas.

En sus términos más generales, las transformaciones de Fourier y de Hartley se han aplicado en campos que se ocupan de fenómenos fluctuantes. Por consiguiente, su campo de aplicación es verdaderamente amplio.

Son muchas las aplicaciones existentes en biología. De hecho, la forma de la doble hélice fue descubierta, en 1962, gracias a las técnicas de difracción de rayos X y al análisis de Fourier. Se enfocaba un haz de rayos X sobre un cristal de hebras de ADN; los rayos X eran difractados por las moléculas de ADN y su espectro de difracción se registraba en una película fotográfica. La pauta geométrica de los rayos difrac-

tados proporcionó la información referente a la amplitud de la transformada de Fourier de la estructura del cristal. La información sobre la fase, que las fotografías no proporcionaban directamente, se dedujo por comparación con las pautas de difracción producidas por compuestos químicos similares. A partir de la información sobre la intensidad y la fase de los rayos X, los biólogos lograron remontarse hasta la estructura cristalina, o sea, hasta la función original. En años recientes, los estudios de difracción de rayos X, combinados con las técnicas del análisis de Fourier "inverso" han revelado la estructura de muchas otras biomoléculas y de estructuras más complejas, como los virus.

La Administración Estadounidense de Aeronáutica y del Espacio (NASA) se vale de la transformación de Fourier para mejorar la calidad y detalle de las imágenes de los objetos celestes tomadas en el espacio. Las sondas planetarias y los satélites en órbita terrestre transmiten imágenes a la Tierra en forma de series de impulsos de radio. Un ordenador transforma estos impulsos mediante técnicas de Fourier. Seguidamente, el ordenador ajusta diversas componentes de cada transformada para reforzar ciertas características y eliminar otras, de forma muy similar a como se elimina el ruido de las transformadas de Fourier de la música grabada. Finalmente, los datos alterados se reconvierten a fin de reconstruir la imagen. Este proceso puede aguzar el enfoque, eliminar niebla de fondo y modificar el contraste.

La transformación de Fourier es también valiosa en física de plasmas, en física de semiconductores, en acústica de microondas, en sismografía, oceanografía, en cartografía por medio del radar y en confección de imágenes en medicina. Entre las muchas aplicaciones a la química, tenemos el espectrómetro de transformación de Fourier, utilizado en análisis químico.

El análisis de Fourier ha demostrado su utilidad en el propio trabajo del autor sobre construcción de imágenes bidimensionales. En 1956, di con un teorema de "proyección por rebanadas" que proporcionó una vía para la reconstrucción de imágenes a partir de integrales extendidas a una banda, problema hoy ampliamente conocido con el nombre de reconstrucción tomográfica. Más tarde, acerté con el "algoritmo modificado de proyección retrógrada", hoy universalmente utilizado en tomografía por rayos X computarizada, conocida por "escáner TAC".

El autor estaba asimismo interesado por la reconstrucción de imágenes basadas en datos de radioastronomía. Deseaba localizar exactamente, sobre la superficie del Sol, las fuentes de emisión de ondas de radio, por lo que aplicó métodos de transformación al diseño de un radiotelescopio de exploración que pudiera confeccionar diariamente mapas de temperaturas de microondas de la superficie solar durante 11 años. Tales métodos condujeron a la primera antena con resolución más fina que el ojo humano; esos métodos se han difundido desde entonces a la tecnología general de antenas. La NASA elogió la confección de los mapas solares por su contribución a la seguridad de los astronautas lunares.

También he aplicado la transformación de Hartley a otros estudios. Recientemente, mi colega John Villaseñor y yo describimos un método óptico para hallar la transformada de Hartley, desarrollo que permite codificar la fase y amplitud de Fourier en una sola imagen real. Hemos creado un dispositivo que construye la transformada de Hartley usando microondas. Estoy preparando ahora artículos sobre física solar, cuyos métodos de análisis de datos procedentes del recuento de manchas solares y de los espesores de las capas sedimentarias de la Tierra se inspiran en técnicas de Fourier.

Tan difundido está el empleo del método de Fourier y de las técnicas analíticas con él emparentadas, que las palabras de Lord Kelvin resultan tan válidas hoy como lo eran en 1867: "El teorema de Fourier no es solamente uno de los resultados más hermosos del análisis moderno, sino que puede decirse además que proporciona un instrumento indispensable en el tratamiento de casi todas las cuestiones de la física moderna, por recónditas que sean".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

JOSEPH FOURIER: THE MAN AND THE PHYSICIST. John Herviel. Clarendon Press, 1975.

THE FOURIER TRANSFORM AND ITS APPLICATIONS, 2.ª EDICIÓN, REVISADA. Ronald N. Bracewell. McGraw-Hill Book Company, 1986.

THE HARTLEY TRANSFORM. Ronald N. Bracewell. Oxford University Press, 1986.

OPTICAL PHASE OBTAINED BY ANALOGUE HARTLEY TRANSFORMATION. John Villaseñor y R. N. Bracewell en *Nature*, vol. 330, n.º 6150, págs. 735-737; 24 de diciembre de 1987.

El encauzamiento de electrones y positrones

Las partículas cargadas que viajan a lo largo de los planos de simetría de un cristal se comportan de manera extraña: no interaccionan con los átomos, sino con las capas o cadenas de núcleos del cristal

Allan H. Sørensen y Erik Uggerhøj

Cuando las partículas cargadas inciden sobre un objeto sólido, suelen dispersarse más o menos al azar tras su choque con los átomos. Pero si el blanco es un cristal y un haz de partículas estrecho y focalizado incide sobre él bajo determinado ángulo, los efectos de las colisiones singulares desaparecen para originar efectos colectivos en los que las partículas se encauzan según largas cadenas o según planos de átomos. Tal encauzamiento puede dar lugar a que una partícula penetre más allá de lo normal en el cristal; el proceso afecta también a la radiación que emite la partícula, confiriéndole propiedades específicas, y aumenta o reduce de manera espectacular las reacciones entre la partícula y los núcleos del cristal que ha servido de diana.

El encauzamiento constituye un sistema adecuado para analizar la estructura del cristal y un nuevo marco para estudiar las interacciones entre radiación y materia. Las aplicaciones de los principios del encauzamiento pueden dar lugar a nuevas fuentes de rayos X y rayos gamma: aceleradores de electrones o positrones formados por cristales, cuidadosamente alineados, de germanio, silicio u otros elementos. Cristales parecidos, colocados para absorber radiación de alta energía, podrían convertirse en detectores de rayos gamma, capaces de ofrecer una resolución angular mucho mejor que la de los existentes hoy día.

ALLAN H. SØRENSEN y ERIK UGGERHØJ trabajan en el Instituto de Física de la Universidad danesa de Aarhus. Estudian la radiación de encauzamiento y otros fenómenos asociados con la penetración de partículas cargadas en la materia. Sørensen empezó a trabajar en el encauzamiento en sus tiempos de doctorando, en los primeros años de nuestra década. Tras defender la tesis, empezó a colaborar con el grupo experimental de Uggerhøj en el CERN (Centro Europeo de Investigaciones Nucleares). Uggerhøj ha dedicado gran parte de su carrera al estudio del encauzamiento. Juntos, Uggerhøj y Sørensen han abordado la producción de pares partícula-antipartícula por rayos gamma que inciden sobre un cristal según su eje, un efecto que podría utilizarse en los telescopios orbitales de rayos gamma de alta resolución.

Para una partícula cargada que incide sobre un cristal según uno de sus ejes de simetría, los átomos del cristal aparecen alineados cual perlas de un collar. Las colisiones con los átomos de una cadena dada guardan una estrecha correlación: si la partícula pasa cerca de un átomo, deberá hacerlo también cerca de los átomos vecinos de la misma cadena. En consecuencia, la cadena actúa como un todo, desviando la partícula cargada como si las cargas discretas de los átomos de aquélla se hubieran difuminado uniformemente a lo largo de la misma. De manera parecida, los planos de átomos de un cristal, que actúen como láminas planas entre las cuales las partículas están confinadas, pueden encauzar a éstas.

Las partículas de carga positiva canalizadas recorren, antes de disipar su energía, una distancia que cuadruplica o quintuplica la que viajarían normalmente. Además, ciertas clases de interacciones, pensemos en un acercamiento notable a los núcleos del cristal diana, se suprimen de manera selectiva. Las repulsiones mutuas confinan la partícula cargada positivamente a los espacios "abiertos" entre las cadenas o los planos, sobre todo; en virtud de ello, las interacciones resultan menos probables. Para las partículas dotadas de carga negativa, la imagen viene a ser, casi exactamente, la opuesta: viajan, con preferencia, según las líneas de núcleos de carga positiva, y así la probabilidad de acercamientos muy próximos se multiplica hasta unas seis veces.

Aunque el efecto que el encauzamiento ejerce sobre la profundidad de penetración y las reacciones proyectil-blanco es bastante notable, los operados sobre la radiación emitida por los proyectiles son quizá más característicos incluso. Las partículas que atraviesan un sólido amorfo producen, a medida que van decelerando, radiación de frenado ("bremsstrahlung") –una ancha banda de emisión de fotones de todas las energías, que abarca hasta la energía de la propia partícula–. Pero las partículas canalizadas emiten haces intensos de fotones de energías fijas. En algunos casos, aparecen líneas de emisión estrechas, muy parecidas a las de los electrones excitados de los átomos.

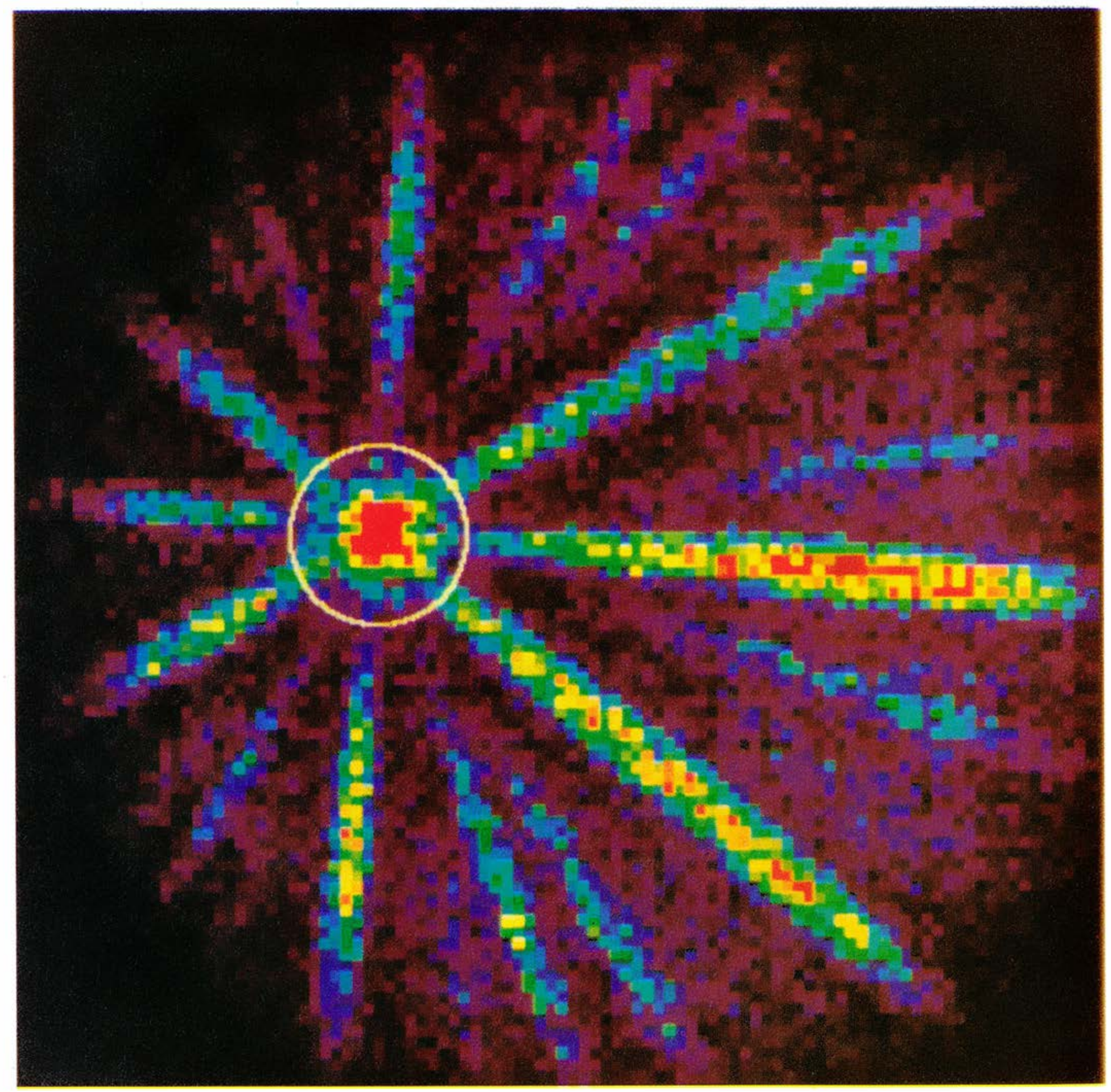
Las partículas más ligeras emiten muchísima más radiación que las pesadas; por ello, el interés actual por el encauzamiento se centra en los electrones y positrones, y no en los protones, las partículas alfa o los piones positivos y negativos. En términos clásicos no relativistas, la energía emitida, por unidad de tiempo, por una partícula cargada es proporcional al cuadrado de su aceleración, que es la fuerza aplicada dividida por su masa. Las fuerzas electrostáticas que actúan sobre el protón y el electrón son de igual intensidad; ahora bien, debido a su distinta masa, la energía emitida por un protón canalizado es seis órdenes de magnitud menor que la emitida por un electrón. Ciertos efectos relativistas ahondan más esa diferencia para cualquier energía.

En un símil clásico del encauzamiento planar, la partícula dotada de carga

positiva es una bola que cae por un largo reguero formado por el espacio entre dos planos de átomos adyacentes. No hay apenas resistencia al movimiento de la bola por el reguero; éste sólo afecta al movimiento de la bola en la dirección transversal. Una partícula cargada positivamente será repelida por los núcleos de carga positiva de los planos que definen las paredes del reguero. Por tanto, la energía de la bola puede dividirse en dos factores: uno grande, que corresponde a la energía cinética del movimiento a lo largo del reguero, y otro pequeño, que corresponde a la suma de la energía cinética transversal y la energía potencial provocada por la interacción entre bola y reguero. Cuando la bola va de un lado a otro del reguero, intercambia energía cinética transversal y energía potencial.

El máximo acercamiento entre el proyectil y un núcleo –el punto de la pared del reguero donde rebota la bola– depende de la energía transversal. Para que tenga lugar una reacción, el punto de retroceso debe estar muy cerca del núcleo o, en la analogía de la bola que cae, muy cerca de la parte superior de la pared del reguero. La probabilidad de un proceso que exige un estrecho contacto entre un proyectil y un núcleo atómico (imaginémonos una reacción nuclear) disminuirá cuando el ángulo máximo entre la trayectoria del proyectil y el plano del cristal decrezca; por debajo de un ángulo crítico, la reacción desaparecerá casi totalmente.

La altura del reguero representa la energía transversal necesaria para que un proyectil pase de un canal planar a otro del cristal; pues bien, a partir de esa altura y de la energía de la partícula incidente, resulta fácil calcular el ángulo crítico por debajo del cual la par-

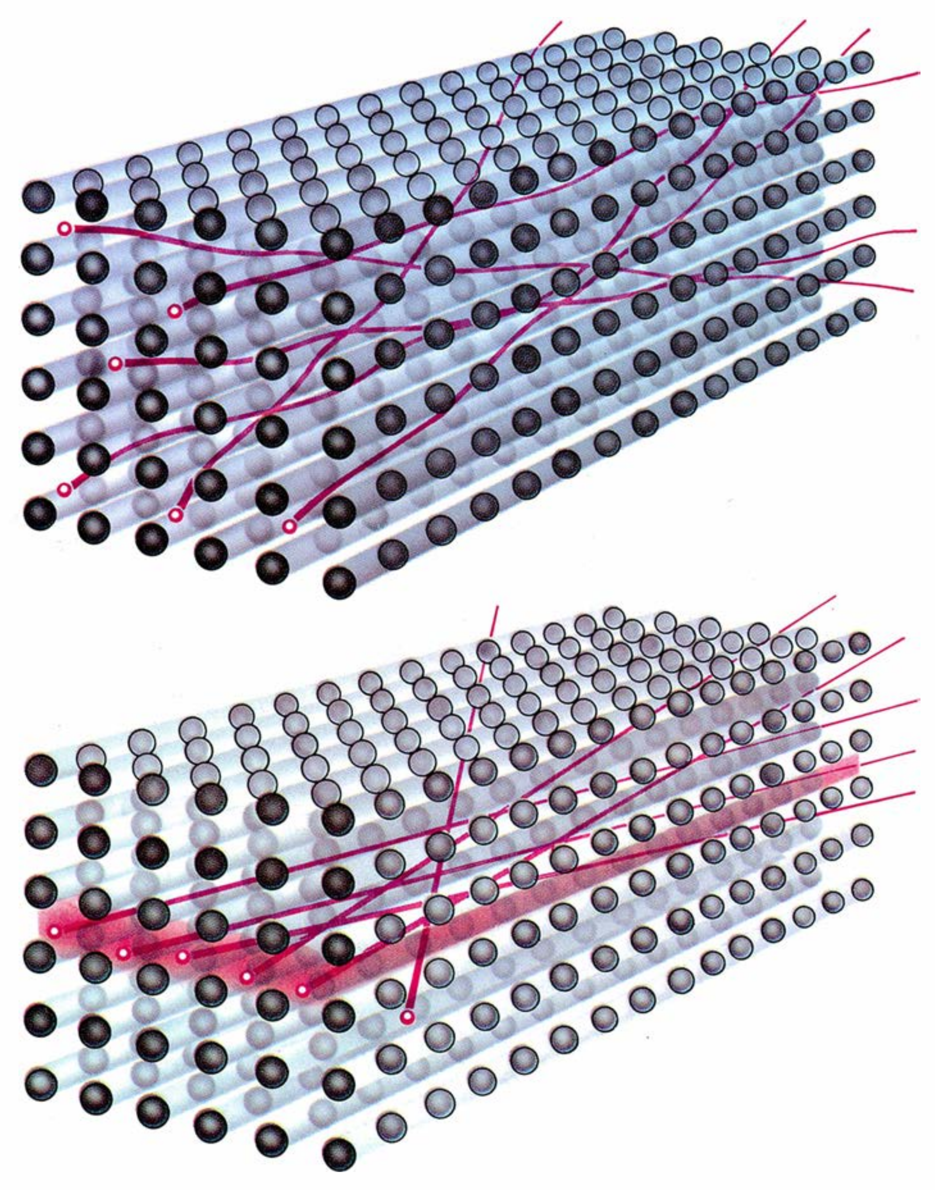


1. PROTONES ENCAUZADOS atraviesan un cristal fino de germanio, en una imagen tomada a lo largo de un eje de simetría. Los colores de la ilustración indican cuántos protones sobreviven al paso sin sufrir los cambios importantes de dirección: los protones encauzados a lo largo de un eje se dispersan menos *(en color rojo)*; los canalizados por los planos cristalinos se dispersan algo más. El recorrido a través de líneas o planos de átomos tiende a causar la máxima dispersión. La mayoría de los protones que atraviesan el cristal en tales direcciones cambian sus trayectorias *(azul, púrpura)*. (Ilustración de Sørensen.)

tícula permanecerá en un reguero único. Para los protones que inciden sobre un cristal de tungsteno con una energía de un millón de electronvolt (MeV), por ejemplo, el ángulo crítico se cifra en unos 0,4 grados; para los mismos protones sobre silicio, en unos 0,2 grados. Para ángulos de incidencia menores, los protones suelen canalizarse; para ángulos mayores, se comportan, en general, como si atravesaran un sólido amorfo.

En el encauzamiento axial no nos sirve ya la imagen del reguero. La partícula viaja a lo largo de un eje cristalino, pero el movimiento transversal se desarrolla en dos direcciones perpendiculares a la dirección del movimiento, no en una sola. Así, podemos representarnos la partícula dotada de carga positiva rodando por una superficie con picos agudos, que simbolizan las líneas de átomos, y amplias llanuras entre cumbre y cumbre. La bola no queda ya confinada al valle entre picos adyacentes, sino que circula por la llanura. Habida cuenta de que la interacción entre un proyectil y una línea de átomos suele ser más intensa que la interacción entre un proyectil y un plano, el ángulo crítico para el encauzamiento axial en un cristal triplica el ángulo crítico del encauzamiento planar: 1,6 grados en el tungsteno y 0,6 grados en el silicio.

En el caso de las partículas que portan carga negativa, la imagen del encauzamiento se invierte. La fuerza entre los núcleos atómicos y los proyectiles incidentes es de atracción, no de repulsión. Los regueros del encauzamiento planar se han invertido; presentan valles agudos que corresponden a los planos de los átomos, en vez de los amplios valles que representaban los espacios entre ellos. Los picos del encauzamiento axial son ahora valles profundos y circulares donde la partícula puede quedar atrapada. Debido a que una partícula con poca energía transversal está forzada a permanecer en la vecindad de un núcleo diana, las reacciones que dependen de acercamientos grandes, lejos de suprimirse, aumentan.



2. LINEAS Y PLANOS DE ATOMOS de un cristal que encauzan las partículas incidentes. En la canalización axial *(arriba)*, las líneas de átomos guían, mediante colisiones laterales, las partículas que inciden bajo un ángulo próximo a un eje cristalino; y así sólo viajan entre las líneas. En el encauzamiento planar *(abajo)* las partículas interaccionan con planos de átomos; son libres de moverse por el plano, pero no pueden pasar de un plano a otro. La ilustración muestra el encauzamiento de partículas cargadas positivamente que son repelidas por los núcleos del cristal. Las partículas de carga negativa se canalizan cerca ya de los núcleos.

Aunque el modelo de la bola y el reguero para describir el encauzamiento nos ofrece una buena explicación intuitiva de la interacción entre partículas cargadas y planos atómicos de los cristales, hablando en puridad no es correcto. El mundo microscópico de las partículas cargadas y los núcleos atómicos está gobernado por la mecánica cuántica, y no por la física clásica. En general, las partículas cargadas no son objetos bien localizados que vayan de un lado a otro entre planos de átomos; antes bien, ocupan estados cuánticos que corresponden a valores específicos de energía longitudinal y transversal. La probabilidad de encontrar, en un modelo mecánico-cuántico, una partícula de determinada energía transversal en una sección dada del espacio transverso difiere bastante, por lo general, de esa probabilidad en otro clásico. ¿Cómo es posible, pues, que la imagen clásica describa tan bien el encauzamiento, en primera aproximación? ¿Cómo acomodar la imagen clásica para dar cuenta de la descripción mecánico-cuántica subyacente?

Cuando se trata de partículas pesadas, citemos los protones o las partículas alfa, la física clásica describe el encauzamiento con suficiente exactitud. La separación física entre los estados cuánticos depende inversamente de la masa; es decir, un mismo espacio puede abarcar más estados cuánticos de una partícula pesada que de otra partícula ligera. Por ejemplo, un átomo que constara de un protón y un antiprotón, en vez de un protón y un electrón, tendría una milésima del radio de un átomo de hidrógeno corriente. Más de 30 niveles energéticos del sistema protón-antiprotón cabrían dentro del radio del nivel energético mínimo del electrón. Los sistemas que tienen muchos niveles cuánticos muy cercanos se comportan de manera parecida a los sistemas clásicos: para los niveles ener-

géticos más elevados, las distribuciones de probabilidad clásica y cuántica (la probabilidad de encontrar una partícula en un lugar determinado) son similares y la transición entre estados cuánticos muy cercanos no se puede distinguir del comportamiento continuo. Estamos aludiendo al principio de correspondencia de Niels Bohr, bien conocido por lo demás.

Los mismos argumentos que valen para los átomos valen también para los proyectiles que se encauzan a través de los cristales: los proyectiles pesados se comportan según las leyes de la mecánica clásica. Su masa les permite albergar más estados cuánticos en el espacio transverso. Además, por tratarse de partículas pesadas que suelen ser de carga positiva, viajan en los espacios existentes entre las líneas o los planos de núcleos, mientras que las partículas de carga negativa viajan por la región muy próxima a los núcleos, que es bastante más angosta. El espacio adicional posibilita incluso más estados cuánticos.

Por el contrario, un electrón de unos pocos MeV de energía, que se encauce axialmente en un cristal de silicio, sólo puede elegir entre 10 o menos estados cuánticos para describir su movimiento transversal. Para el encauzamiento planar, donde el reguero es mucho menos profundo, el electrón puede estar restringido a un estado de movimiento transversal. El limitado número de estados cuánticos provoca un conjunto de consecuencias contrarias a la intuición: por ejemplo, para los estados de baja energía, la densidad de probabilidad –la probabilidad de encontrar el electrón en una posición dada del canal– difiere mucho de las predicciones clásicas. La estructura cuántica aparece también en los espectros de la radiación emitida por los electrones encauzados. Los electrones encauzados emiten radiación a longitudes de onda determinadas, que corresponden a las transiciones de un estado de energía transversal a otro.

Sin embargo, aun cuando el electrón se halle limitado a ciertos estados cuánticos, parte de su comportamiento admite una explicación clásica. Así, las predicciones clásica y cuántica se acercan bastante en lo que se refiere a la dispersión de los electrones causada por encuentros muy próximos con núcleos. En estos sucesos de colisión, los electrones se desvían de sus trayectorias originales en ángulos mucho mayores que el ángulo de encauzamiento crítico. Las predicciones clásica y cuántica coinciden porque la densidad de probabilidad total de los electrones, en regiones cercanas a los núcleos, no difiere mucho de la probabilidad clásica. Y de ese modo, aun cuando los efectos cuánticos dominen el fenómeno que se estudia, podemos recurrir a veces a la mecánica clásica para modelarlo.

Los mismos principios básicos que gobiernan el encauzamiento a energías moderadas valen también para energías más elevadas de los proyectiles, cuando adquieren importancia los efectos de la relatividad especial. Los efectos relativistas entran en juego cuando una partícula se mueve a una velocidad cercana a la de la luz. A tales velocidades, la energía cinética de un proyectil se hace comparable, o supera, a su energía en reposo (la energía equivalente a su masa en reposo). Para los protones, este umbral es de unos mil millones de electronvolt (GeV); para los electrones, se cifra en unos 500.000 electronvolt.

Para una partícula que se mueva en un cristal a una velocidad relativista, el número de estados cuánticos disponibles no sólo depende de su masa en reposo y de su carga, sino también de su factor de Lorentz, gamma, que mide la razón entre la energía total de una partícula y su energía en reposo. El número de estados disponibles aumenta con gamma debido al achicamiento o escorzo provocado por el movimiento relativista. Los objetos que viajan a velocidad próxima a la de la luz parecen más prietos en la dirección del movimiento en un factor gamma. (Es lo que se llama contracción de Lorentz-Fitzgerald.) Tal como la partícula encauzada "ve" las cosas, el cristal se le viene encima a casi la velocidad de la luz. El cristal aparece contraído; y, así, el espacio aparente entre los átomos es menor. Esta contracción aumenta la cantidad de carga por unidad de longitud en las cadenas de átomos que canalizan la partícula, ahondando la profundidad de los pozos de energía potencial y creando espacio, por tanto, para estados adicionales de energía transversal. Este incremento relativista del número de estados cuánticos puede atribuirse también al incremento relativista (en el sistema de referencia del laboratorio) de la masa de la partícula. A altas energías, una partícula ligera se comporta como si fuera bastante más pesada, con el consecuente aumento del número de estados cuánticos. Entonces, paradójicamente, los electrones de muy alta energía (GeV o más) manifiestan también un comportamiento clásico, debido a que tienen muchos estados cuánticos entre los que escoger.

La relatividad no sólo tiene que ver con la separación entre los estados cuánticos de las partículas encauzadas, sino que interviene también en la radiación emitida cuando las partículas realizan transiciones de un estado a otro. Si sólo tomara parte la energía transversal, los fotones emitidos por un electrón con energías de unos pocos MeV caerían en la región visible o infrarroja del espectro. Cuando la energía del electrón aumentara, incrementando el número de niveles cuánticos disponibles y reduciendo su separación, la energía de los fotones emitidos tendería a disminuir. Sin embargo, los efectos relativistas desplazan la longitud de onda de los fotones emitidos por tales electrones hacia la parte de rayos X del espectro.

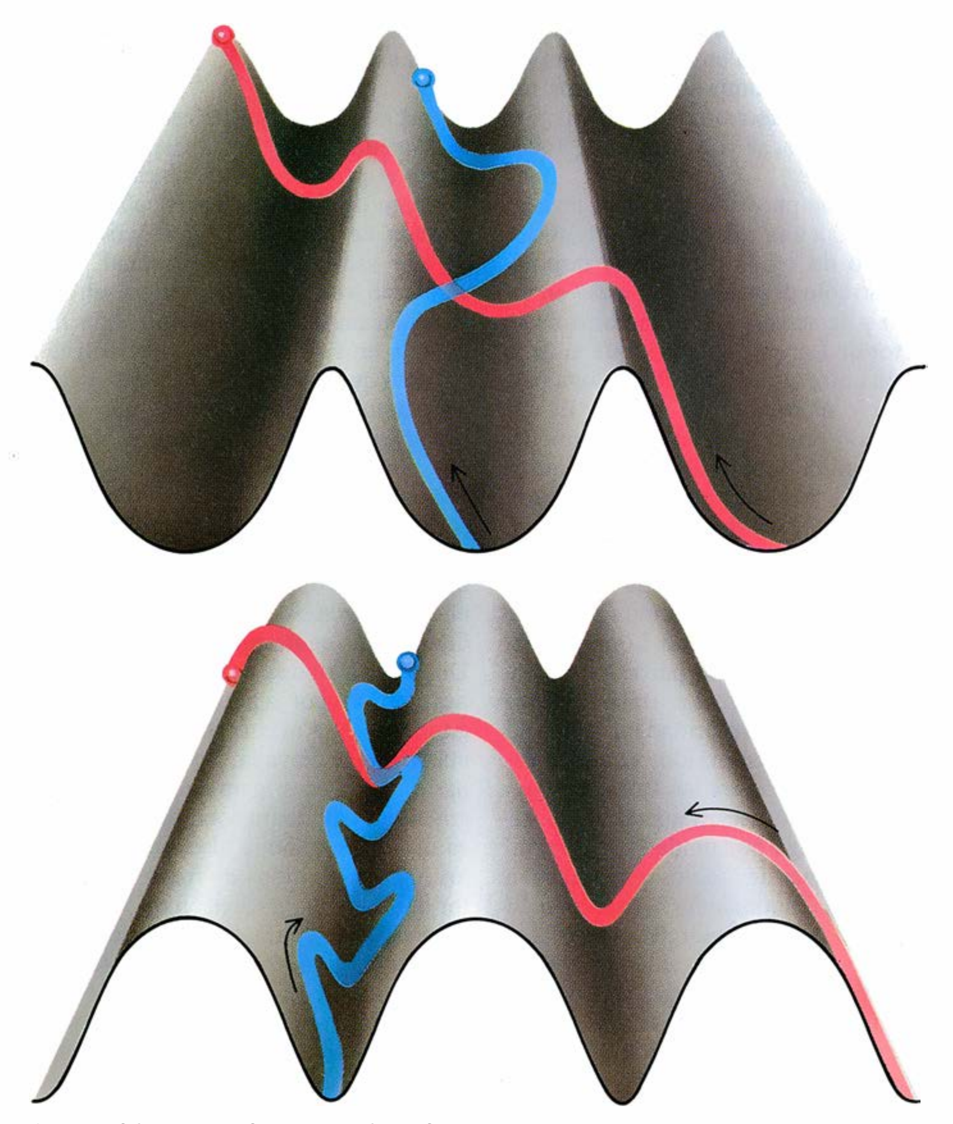
La base relativista de este desplazamiento puede comprenderse mirando el proceso de la radiación desde el punto de vista de la partícula. En el sistema de referencia de la partícula, no hay movimiento longitudinal, sino sólo transversal. Sin embargo, el potencial transverso aumenta en un factor gamma en virtud de la contracción relativista que reduce la separación entre los átomos. En consecuencia, una transición en energía transversal se agranda, por el mismo factor, en relación con el sistema de referencia de laboratorio. Además, al volver del sistema de referencia de la partícula al del laboratorio, se obtiene otro aumento de energía: por moverse la partícula, la radiación que emite sufre un corrimiento Doppler. Mirados de frente, los fotones emitidos por la partícula tienen longitud de onda más corta y, por tanto, energía más elevada, en un factor de hasta dos veces gamma. Por consiguiente, el aumento total de la energía es dos veces gamma al cuadrado para los fotones emitidos de frente –un factor de 200 para un electrón de 5 MeV–. Con eso basta para convertir un fotón infrarrojo en un fotón de rayos X.

Además del desplazamiento relativista de la energía, la radiación de una partícula encauzada experimenta una colimación relativista. Aunque, en el sistema de referencia en reposo del electrón encauzado, los fotones se emiten casi por un igual en todas direcciones, la emisión observada en el laboratorio se ve privilegiada en la dirección delantera. Normalmente, la mitad de los fotones se emiten dentro de un ángulo de 1/gamma radianes (2π radianes corresponde a los 360 grados de la

circunferencia) en torno a la dirección del movimiento de la partícula encauzada. Debido a que sufren el corrimiento Doppler, estos fotones llevan la mayor parte de la energía radiada.

La radiación emitida por electrones de energía de unos pocos MeV encauzados por cristales de elementos ligeros, tales como el carbono o el silicio, da lugar a una serie de líneas espectrales discretas, normalmente a las longitudes de onda de los rayos X. Cuando aumenta la energía del electrón, desaparece gradualmente la estructura de las líneas de emisión. El número de estados cuánticos transversales crece al hacerlo la profundidad del pozo de energía potencial en el que viajan los electrones, provocando que el número de posibles transiciones aumente también. Como las líneas tienen todas una anchura finita, tienden a mezclarse y formar un continuo. Este cambio del espectro imita el cambio de comportamiento mecánico-cuántico a comportamiento clásico en los propios niveles energéticos.

La radiación emitida en un proceso a energías aún mayores –positrones de unos GeV de energía sometidos a encauzamiento planar– ha atraído la atención de los físicos ante la sencillez del modelo que describe su producción y el monocromatismo, casi absoluto, de su radiación. La fuerza entre un conjunto de planos cristalinos y el positrón depende linealmente del desplazamiento del positrón con respecto al centro del canal. La fuerza de recuperación conduce a una oscilación transversal regular cuya frecuencia resulta casi independiente de la energía transversal. Los positrones actúan como pequeños péndulos: su período no depende de la longitud de sus excursiones desde la línea central de su camino. En consecuencia, todos los fotones emitidos en la dirección hacia delante tienen casi la misma energía: entre 10 y 100 MeV para positrones de entre 1 y 10 GeV en un cristal de silicio, según sea la energía exacta del positrón y el plano de encauzamiento.



3. ANALOGIA DE LA BOLA Y EL REGUERO para describir el comportamiento de partículas encauzadas por planos cristalinos. Aunque las bolas no experimentan resistencia a lo largo de la dirección de su curso, su movimiento transversal está confinado. Una partícula cargada *(azul)* viaja por el borde del reguero, intercambiando energía cinética por energía potencial; invierte, por último, su movimiento transversal. Las partículas con demasiada energía transversal para ser encauzadas *(rojo)* pasan de un reguero al siguiente. Cuando se trata de partículas cargadas positivamente *(arriba)*, el reguero tiene fondos planos y lados pendientes; si dotadas de carga negativa, ocurre lo contrario *(abajo)*. Los núcleos se alojan en las paredes de los regueros en el caso de las partículas positivas y en los valles en las negativas. El encauzamiento suprime las reacciones entre las partículas positivas y los núcleos, pero las potencia para las partículas negativas.

La intensidad de la radiación de encauzamiento es mayor que la de la radiación de frenado convencional. El incremento resulta de la colisión coherente que tiene lugar para ángulos pequeños. Como las partículas encauzadas viajan a lo largo de líneas de átomos, a una colisión lateral –y la emisión de fotones que provoca– seguirán muchas otras. Por el contrario, las partículas que atraviesan un medio amorfo sufren colisiones y dispersiones bajo ángulos muy diferentes y producen emisiones menos intensas, de espectro ancho. La intensidad de radiación de encauzamiento multiplica unas 50 veces la intensidad de la radiación de frenado convencional para energías de rayos gamma de hasta algunos GeV. Conviene, sin embargo, recordar que este aumento afecta sólo a los fotones con energías que representan un bajo porcentaje de la energía del impacto; los fotones de frenado pueden emitirse a cualquier energía hasta la energía cinética del proyectil. Las partículas encauzadas emiten menos radiación de energía muy alta que las partículas sin canalizar.

Cuando la energía de los electrones o positrones incidentes aumenta aún más, hasta niveles por encima de unos GeV, la descripción clásica de la radiación de encauzamiento queda de nuevo invalidada. A estas energías, hay fácilmente estados cuánticos transversales en número suficiente para aproximarse a un continuo. Pero se incumple otra hipótesis. El tratamiento clásico del proceso de radiación se basa en la trayectoria de la partícula, que permanece esencialmente inalterada cuando emite fotones. Ahora bien, en virtud de los efectos relativistas antes examinados, la energía media de los fotones emitidos aumenta como el cuadrado del factor de Lorentz. A tan altas energías, un fotón radiado puede llevarse una fracción apreciable de la

energía del proyectil, alterando así su trayectoria de manera importante.

Por otro lado, a estas energías muy altas aparece otro efecto que simplifica los cálculos de la radiación. A bajas energías, el cono en cuyo interior se emiten los fotones mide unos pocos grados y es mucho más ancho que la fracción de grado en que varía la trayectoria de los electrones o positrones cuando viajan canalizados entre las líneas o los planos de átomos. A altas energías, la colimación relativista estrecha el cono de emisión; se torna mucho más angosto que la excursión angular del proyectil. No barre un haz ancho mediante un ángulo estrecho, de manera que se solape y no pueda distinguirse la radiación procedente de distintos segmentos de la trayectoria; antes bien, el proyectil de alta energía radia un haz estrecho que barre un ángulo mayor. Las aportaciones de un punto cualquiera de la trayectoria son independientes.

La trayectoria del proyectil podemos asimilarla, pues, a un conjunto de pequeños segmentos, en el que la radiación de cada uno de éstos se calcula de forma independiente. Además, dentro de cada segmento de la trayectoria, el campo electromagnético de los átomos del cristal permanece, digámoslo así, constante; lo que favorece las cosas, porque el problema de la emisión de fotones por una partícula cargada que se mueve en un campo electromagnético intenso y constante es algo sabido. Esta aproximación del campo constante es también aplicable, a muy altas energías, para partículas sin canalizar. El modelo predice, adviértase, un aumento sustancial de la radiación, por encima de los niveles observados en blancos amorfos, cuando un haz de partículas incide según una dirección comprendida entre 0,01 y 0,1 grados respecto de un eje del cristal, según sea el material que lo forma.

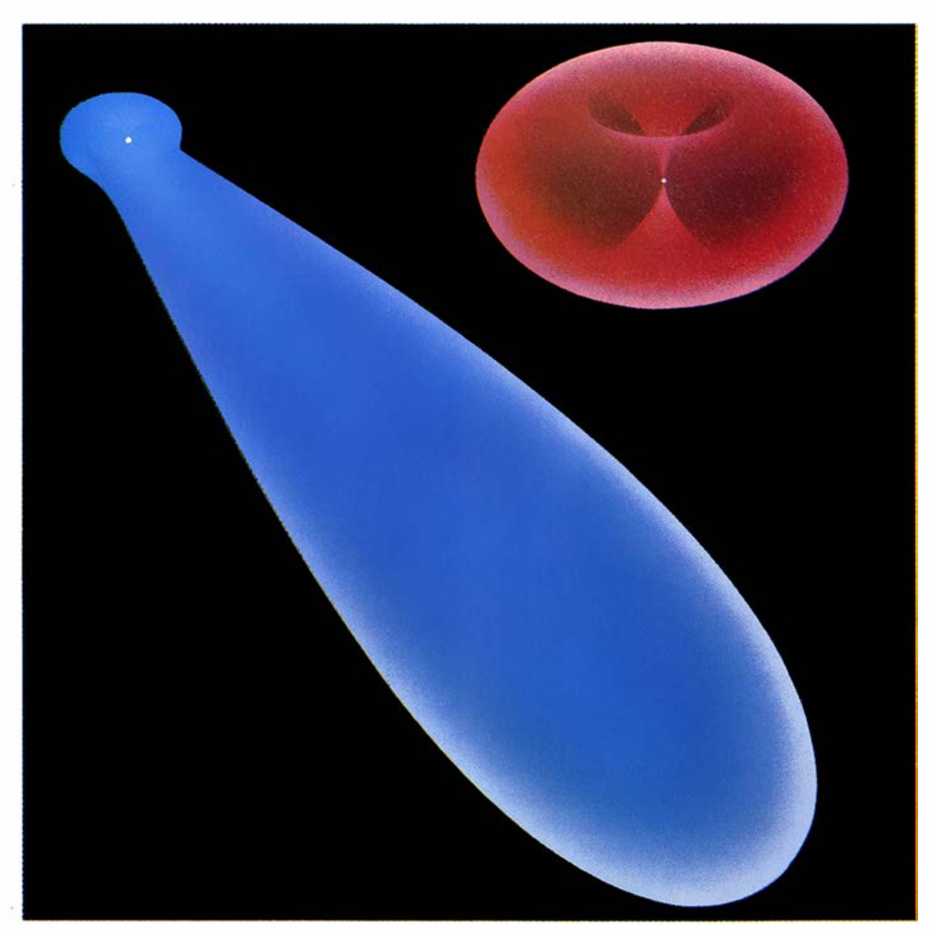
La capacidad de una partícula encauzada de alta energía para radiar casi toda su energía cinética en un único fotón provoca un efecto que no existe a menor energía: el aumento de la creación de pares partícula-antipartícula por los fotones. En presencia de un campo electromagnético externo, así el campo eléctrico que se desarrolla dentro de un cristal, un fotón energético puede convertirse en un par electrón-positrón. Se gasta aproximadamente un MeV en la creación de la masa del par y el resto proporciona energía cinética al electrón y al positrón. La creación de pares acontece también en blancos amorfos, pero el efecto aumenta cuando los fotones se mueven a lo largo del eje de un cristal, debido a que las líneas o planos de los átomos presentan un campo electromagnético más intenso y más coherente. El aumento en la producción de pares se patentiza por encima de un umbral de energía que depende del cristal canalizador; a lo largo del eje más eficiente de un cristal de germanio, por ejemplo, este umbral es de 40 GeV.

Por ser eléctricamente neutro el fotón, no hay efectos focalizadores a lo largo del eje cristalino. El fotón no se canaliza: no tiene su trayectoria dirigida según el eje del cristal. Implica ello que no existe un umbral angular como el ángulo crítico de encauzamiento que existe para electrones y positrones. En cambio, la producción potenciada de pares por fotones alineados según un eje muestra la misma distribución angular que el aumento sobre la radiación de frenado encontrado para partículas cargadas de alta energía alineadas con los ejes cristalinos. En el germanio, la producción de pares se distingue fácilmente en ángulos por debajo de los 0,1 grados con respecto a un eje cristalino.

La radiación de encauzamiento presenta diversas aplicaciones como instrumento de investigación para estudiar la estructura del estado sólido y otros fenómenos. Para electrones y positrones de unos MeV, las líneas de emisión discretas constituyen una huella de los distintos estados del movimiento del proyectil. A su vez, estos estados proporcionan información acerca de la estructura interna del cristal en el que tiene lugar el encauzamiento. En tal "espectroscopía de encauzamiento", las posiciones de los picos de los fotones son sensibles a los detalles de la distribución de los electrones que les sirven de diana entre los átomos de la red cristalina. En las zonas con alta densidad de electrones, los núcleos atómicos se apantallarán; el pozo de energía potencial será entonces menos profundo y los estados cuánticos que tiendan a colocar electrones en dichas regiones se desplazarán hacia niveles energéticamente superiores. En las zonas de baja densidad, el potencial será más profundo. Además, la posición transversal más probable de la partícula encauzada variará en función de su estado cuántico. Por consiguiente, pueden hacerse experimentos para explorar regiones a distancias determinadas de los núcleos controlando la energía transversal de la partícula.

Las posiciones de los picos proporcionan información sobre la magnitud de las vibraciones térmicas de los átomos del blanco; el análisis de la anchura de cada línea nos revela hasta qué punto dichas vibraciones se producen al azar o guardan correlación. Todas las líneas de emisión presentan una anchura finita de acuerdo con el principio de incertidumbre; implica éste que los niveles energéticos de los electrones no pueden conocerse exactamente, ya que los electrones sólo se hallan un tiempo limitado en cualquier estado dado. La incertidumbre en los niveles energéticos se traslada a la incertidumbre en las diferencias entre dos niveles y, así, a la energía del fotón emitido en la transición. Los electrones sometidos a unos 5 MeV de energía tardan unos tres femtosegundos en atravesar un cristal de una micra de anchura en el sistema de referencia del laboratorio, e incluso menos (en un factor gamma) en su propio sistema de referencia. Tras tomar en consideración el corrimiento Doppler, que aumenta la energía total y la anchura de la línea, la incertidumbre es de unos cientos de electronvolt. Pero si un electrón encauzado es dispersado por un átomo cuyo movimiento térmico errático lo coloca directamente en su trayectoria, fenómeno que sucede a menudo, la vida media del estado cuántico encauzado será mucho menor que el tiempo de vuelo a través del cristal y la anchura de línea correspondiente será mayor. En una porción importante de casos, se ha descubierto que las vibraciones de un átomo guardan correlación con las de sus vecinos, de manera que una colisión con uno implica una colisión con otros, acortando aún más las vidas medias y ensanchando las líneas. El grado exacto de correlación se infiere del grado en el que se ensanchan las líneas. Sin embargo, aún no está claro si la radiación de encauzamiento será competitiva con otras técnicas mejor establecidas para estudiar las estructuras cristalinas.

Quizás el destino más prometedor de la radiación de encauzamiento resida en su aplicación como fuente de radiación, intensa y sintonizable, de rayos X y gamma. Los rayos X pueden generarse utilizando los picos cuánticos que aparecen a energías de los electrones de unos MeV; las emisiones de positrones de unos GeV encauzados planarmente sirven para generar rayos gamma. Las partículas en encauzamiento planar vibran sólo perpendicularmente a los planos de canalización;



4. LA COLIMACION RELATIVISTA transforma la pauta de radiación emitida por una partícula encauzada. En el sistema de referencia de la partícula, los fotones se emiten en todas las direcciones (excepto hacia arriba y hacia abajo); en el sistema de referencia del laboratorio, sin embargo, la radiación se ve principalmente en un estrecho cono situado en la dirección del movimiento de la partícula. En virtud del llamado efecto Doppler aumenta la energía observada de los fotones que se han emitido dentro del cono en cuestión.

por eso, la radiación resultante estará muy polarizada, gracias a lo cual adquiere particular interés para investigaciones de procesos que dependen de la polarización y para experimentos en los que se debe extraer una señal de un fondo sin polarizar.

Se está empezando a usar la radiación de encauzamiento como fuente de rayos X. Pero la producción de fotones es bastante baja: normalmente un fotón por mil electrones incidentes, lo que hace difícil producir haces muy intensos. Más prometedor parece convertir el encauzamiento en fuente de rayos gamma; por la sencilla razón de que viene a producir un fotón por positrón incidente, y hay pocas fuentes que le hagan competencia.

Algunos grupos han propuesto la utilización de los rayos gamma generados en el encauzamiento para estudiar los niveles energéticos de los núcleos pesados fisionables. Los rayos gamma de energía conocida pueden estimular un núcleo hasta estados excitados en los que resulta más probable la fisión; la radiación sintonizable de los positrones encauzados se adecua a este propósito. La misma radiación sirve también para que los elementos ligeros, tales como el deuterio o el berilio, se vean inducidos a emitir neutrones, y hacerlo de manera eficiente. La radiación encauzada está muy colimada; por ello, el radio eficaz de la fuente de neutrones es el mismo que el radio del haz de partículas que produce la radiación: muy pequeño, de sólo unas micras. Pero la resolución es grande en el tiempo y en el espacio: un pulso del haz de partículas puede producir pulsos de neutrones cortísimos, de escasos nanosegundos. La fuente de neutrones resultante serviría para estudiar muchos fenómenos dependientes del tiempo.

Se han propuesto muchas aplicaciones más de la radiación de encauzamiento. Reviste especial interés la posibilidad de un láser de encauzamiento. Los láseres funcionan creando inversiones de población, en las que los estados de mayor energía contienen más electrones que los estados de energía menor. El electrón que cae de un estado alto a otro bajo emite un fotón, y éste estimula una cascada de transiciones y emisiones de los otros electrones. En un láser de encauzamiento, los electrones en estados de alta energía transversal superarían a los que se hallaran en estados de energía menor; la emisión láser resultante se produciría a longitudes de onda de los rayos X. Por desgracia, un láser de encauzamiento exigiría una corriente eléctrica muy elevada, del orden de 10.000 ampère por centímetro cuadrado, que no tardaría en calentar el cristal y estropearlo.

Los procesos direccionales de alta energía (por encima de 40 GeV) representan las únicas aplicaciones propias. Algunas de éstas podrían desarrollarse en un futuro próximo; por ejemplo, los detectores de fotones de alta energía sensibles a la dirección. Se podrían embarcar en satélites telescopios de rayos gamma que se fundan en el aumento de los efectos de creación de pares. Un fotón gamma dotado de una energía por encima de los 100 GeV acarrea una alta probabilidad de producir un par electrón-positrón en un cristal de germanio que mida de dos a tres milímetros de espesor, siempre que el fotón incida con un ángulo de unos 0,05 grados con respecto al eje principal. El electrón y el positrón interactúan con el cristal; radiarían entonces fotones de alta energía, que crearían más pares, resultando muchos electrones, positrones y fotones de menor energía. Con energías de impacto elevadas y según el eje más eficaz de un cristal de germanio, tales cascadas se desarrollan más o menos en un centímetro, sin que se precisen los 20 necesarios en un impacto sin alinear. Sustituyendo el germanio por elementos más densos de mayor número atómico, tales como el tungsteno, se generalizaría el rango de utilidad de este efecto a otras energías del fotón menores. Esos detectores de rayos gamma podrían aprovecharse para mejorar la resolución angular de los mapas de rayos gamma del cielo en órdenes de magnitud. Los actuales telescopios de rayos gamma sólo pueden determinar la posición de una fuente en un grado. El silicio y otros materiales podrían no sólo servir para estimular la creación de pares, sino también para detectar los pares electrón-positrón; la construcción de un telescopio basado en tales cristales no encerraría mayor dificultad.

Quedan algunos problemas relativos al encauzamiento y procesos afines cuando nos movemos en energías del GeV. Aunque los ritmos de creación de pares concuerdan muy bien con las predicciones teóricas de la variación con la energía y el ángulo, los investigadores teóricos se las ven y se las desean a la hora de predecir el espectro de la radiación emitida por las partí-

culas encauzadas de alta energía. En cierto experimento realizado con electrones y positrones de 150 GeV encauzados en un cristal delgado de germanio, los electrones producían más fotones que los positrones –fenómeno que era de esperar, ya que los electrones pasan más cerca de los núcleos, donde los campos eléctricos alcanzan mayor intensidad–, pero la mayoría de los fotones sobrantes se agrupaban en un pico intenso, al 85 por ciento de la energía del electrón. Nadie esperaba la aparición de ese pico.

Los físicos teóricos han conseguido inferir ya el mecanismo responsable: los electrones emiten múltiples fotones que se registran como si se tratara de uno solo con la energía combinada de todos los fotones componentes. Ese proceso de "enfriamiento radiativo" reduce la energía transversal de los electrones, y así éstos pasan incluso más tiempo en la vecindad de los núcleos con lo que intensifican la emisión. De momento no se ve la necesidad de apelar a nuevos principios para explicar el fenómeno.

Los datos experimentales suministrados hasta la fecha, bastante magros, no han permitido someter a una comprobación exhaustiva la teoría. Podrían presentarse otros fenómenos igualmente inesperados cuando electrones y positrones se canalicen en energías aún mayores. Se necesitan urgentemente más experimentos para determinar qué modelos gobiernan el comportamiento de las partículas encauzadas en los regímenes de máximas energías.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHANNELING AND RELATED EFFECTS IN THE MOTION OF CHARGED PARTICLES THROUGH CRYSTALS. Donald S. Gemmell en *Reviews of Modern Physics,* vol. 46, n.º 1, págs. 129-227; enero de 1974.

CHANNELING RADIATION. J. U. Andersen, E. Bonderup y R.H. Pantell en *Annual Review of Nuclear and Particle Science,* vol. 33, págs. 453-504; 1983.

CHANNELLING AND CHANNELLING RADIATION. Allan H. Sørensen y Erik Uggerhøj en *Nature,* vol. 324, n.º 6102, págs. 311-318; 22 de enero de 1987.

PARTICLE PRODUCTION IN CRYSTALS. Allan H. Sørensen y Erik Uggerhøj en *Nature,* vol. 327, n.º 6123, págs. 558 y 559; 18 de junio de 1987.

RELATIVISTIC CHANNELING. Editado por Richard A. Carrigan, Jr., y James A. Ellison. NATO ASI Series, Series B: Physics, vol. 165. Plenum Press, 1987.

CHANNELING AND OTHER PENETRATION EFFECTS. Editado por E. Uggerhøj. Special volume of Nuclear Science Applications, en prensa.

Autenticidad de las esculturas antiguas de mármol

Demostrar la autenticidad de una escultura de piedra es tarea ardua. Ante el encarecimiento de estas obras, se ha recurrido a los geoquímicos para resolver los graves problemas que se les plantean a los expertos en historia del arte

Stanley V. Margolis

En 1984, el Museo J. Paul Getty de Malibú, California, recibió el ofrecimiento de compra de un kouros griego arcaico: una espúrea figura marmórea de un joven. La estatua medía un par de metros de altura. Se decía que poseía más de 2500 años de antigüedad. En magníficas condiciones de conservación, era desconocida por los historiadores de arte. Afirmábase que había formado parte, durante muchas décadas, de una colección suiza privada. Basándose en la presumible importancia de la pieza, el propietario puso un precio astronómico, el más alto que jamás se hubiera pagado por una escultura antigua. Varios periódicos de amplia difusión dieron la noticia de que la cotización estaba entre los 8 y 12 millones de dólares.

Según Marion True, directora de antigüedades del museo, la mayoría de los historiadores de arte que habían examinado el kouros certificaron su autenticidad. Pero otros la pusieron en duda. A éstos les desconcertaba su magnífico estado de conservación y ciertas anomalías de estilo. Además, la superficie dejaba ver rasgos sospechosos cuando se examinó con luz ultravioleta. La opinión habitual –no probada, sin embargo, por experimentos rigurosos– sustenta que las superficies marmóreas antiguas emiten una fluorescencia ámbar moteada con púrpura. La fluorescencia del kouros dio una luz púrpura uniforme, que es un color asociado con superficies modernas. Considerada la importancia potencial que encerraba la estatua, amén de su precio y las dudas que se habían formulado, los responsables del museo pidieron pruebas científicas definitivas de su autenticidad antes de negociar la compra de la pieza.

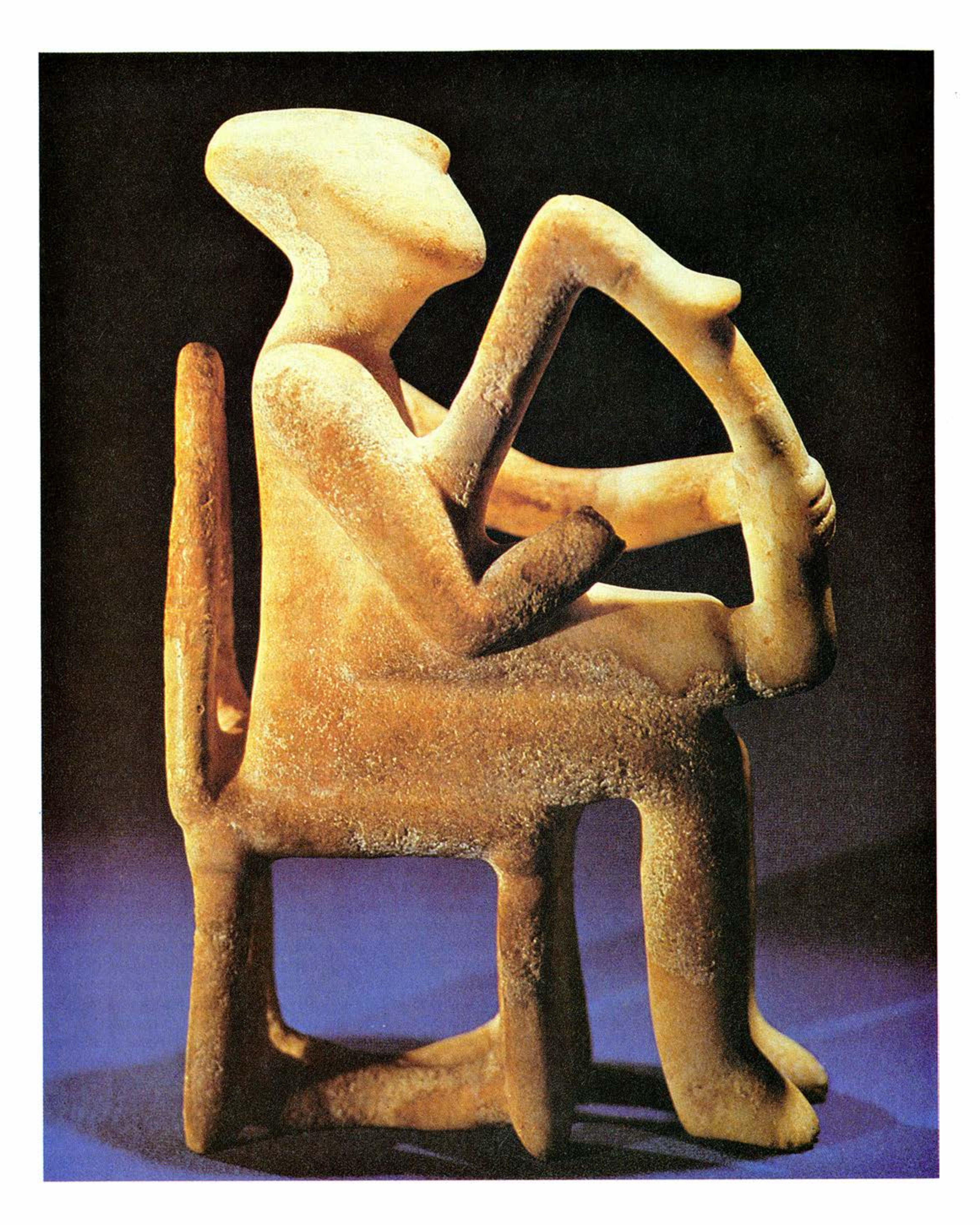
En los objetos líticos se hace mucho más difícil comprobar la autenticidad que en las pinturas, cerámicas y otras obras de arte. La edad absoluta de las rocas no nos revela cuándo intervino el cincel del escultor. Pero sí hay métodos para determinar en qué momento la superficie de una piedra se expuso por primera vez al ambiente. Los geoquímicos y los geólogos suelen datar la edad de los afloramientos de una roca expuesta en razón de la meteorización que ocurre cuando la superficie de la roca reacciona con su entorno químico. A pesar de lo cual, los directores de museos y coleccionistas no suelen consultar con los geólogos sobre la autenticidad de las esculturas marmóreas. Sueñan quizás en escenas horribles de brutos que atacan sus inapreciables obras maestras con martillos y taladros.

Fue, pues, una nueva experiencia para todos cuando el Museo Getty me invitó a aplicar mi experiencia de geoquímico marino para determinar la edad del kouros. Recibí incluso permiso para extraer y analizar pequeñas muestras de la roca. Al terminar mi análisis, más de un año después, el kouros había sufrido quizás el examen más exhaustivo que ninguna otra escultura antigua de mármol. Se trataba, a buen seguro, de la primera ocasión en que un museo había tomado ese camino antes de decidirse. Gracias, en parte, a ese trabajo, los métodos científicos para atestiguar la autenticidad de las esculturas marmóreas constituyen hoy procedimientos rutinarios para los responsables de los más prestigiosos museos del mundo.

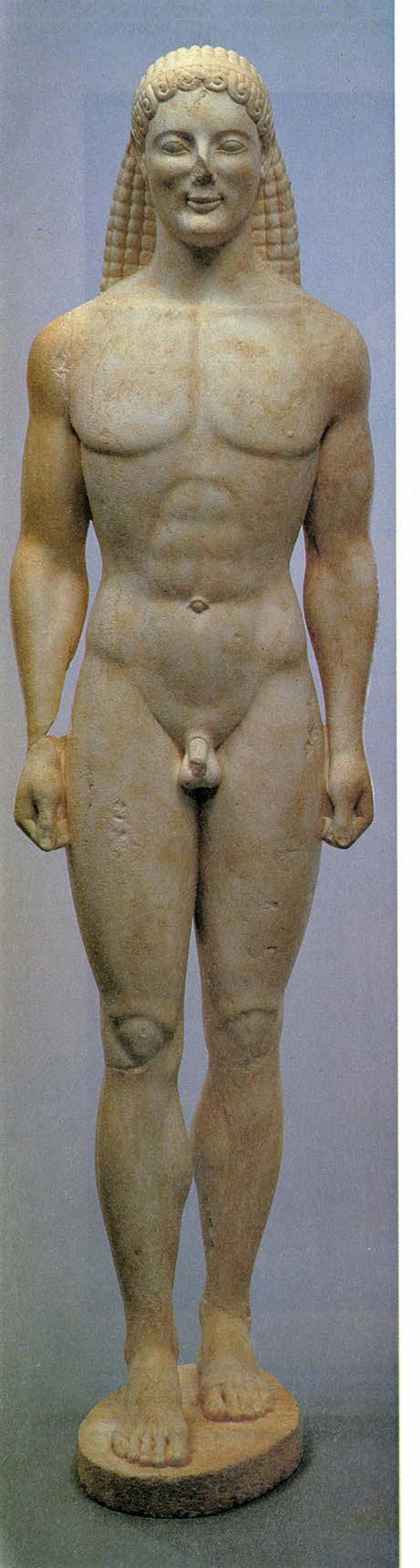
En teoría, muchas clases de objetos líticos admiten datación por métodos geoquímicos, aunque el mármol reviste especial interés. Durante más de 7000 años, las esculturas de mármol han reflejado el progreso artístico y espiritual de la civilización occidental. Los escultores han apreciado la superficie traslúcida del blanco mármol y su capacidad para someterse a un buen pulido. En los albores de la edad de bronce, los isleños de las Cícladas tallaron con exquisitez sencillas figuritas de guijarros de mármol recogidos del suelo. Hacia el primer milenio antes de Cristo, los griegos fueron extrayendo grandes bloques de mármol de la isla de Naxos, utilizando probablemente técnicas aprendidas de los egipcios. En la época romana, la escultura griega, muy codiciada, se copió por doquier. Los coleccionistas, del Renacimiento a nuestros días, han venido invirtiendo grandes sumas de dinero en esculturas de mármol de la antigüedad.

Casi parejamente al comercio de las esculturas de mármol, se ha desarrollado otra industria floreciente de imitaciones y falsificaciones. Para distinguir las piezas auténticas de las falsas, los expertos se han fijado en el estilo, en la iconografía y en el contexto histórico-artístico de cada objeto. Se ha mirado también el aspecto de la capa superficial, o pátina, para establecer la

STANLEY V. MARGOLIS enseña geología en Davis y oceanografía en Santa Barbara, de la Universidad de California. Inició su formación en ambas disciplinas en la de Miami, doctorándose, en 1971, por la californiana. En 1981, trabajó como investigador principal del área de oceanografía en el Servicio de Investigación y Desarrollo Naval. A través del análisis de sedimentos marinos, Margolis ha estudiado la historia de las glaciaciones polares, los cambios en el clima global y los efectos ambientales de la explotación minera del océano. Presta hoy sus conocimientos a la conservación de obras de arte y la geoarqueología.



1. ARPISTA de mármol de calcita, propiedad del Museo de Bellas Artes de Virginia. Se cree que se esculpió hace 4600 años en las islas Cícladas. Su autenticidad están en entredicho ante las incongruencias de estilo observadas en la silla y en el emplazamiento del arpa. La pátina marrón está salpicada de depósitos insólitos de yeso blanco. Los análisis isotópicos demostraron que el mármol vino de las canteras de Naxos, un origen coherente con la supuesta procedencia de la pieza. El yeso podría haberse depositado por evaporación del agua salina intersticial del suelo, lo que explicaría por qué la parte superior está enriquecida en carbono 13 y en oxígeno 18. Los estudios en curso de esculturas de las Cícladas determinarán si estos rasgos geoquímicos son representativos.



edad de la talla. Ahora bien, el mármol resiste bastante los ataques de la meteorización en la mayoría de las condiciones naturales; y, así, los efectos del paso del tiempo y la exposición al ambiente suelen pasar inadvertidos a primera vista. Además, los falsificadores procuran remedar la pátina con varios trucos, desde enterrar en forraje vacuno hasta aplicar ácido o pastas que aparenten un recubrimiento antiguo. Numerosas controversias sobre piezas importantes han quedado sin resolver por falta de pruebas objetivas.

En el transcurso de sus propias investigaciones, los geoquímicos han avanzado muchísimo en el conocimiento del mármol y sus precursores: sedimentos carbonatados y calizas, que, en un proceso de metamorfismo, se convierten en mármoles cuando se hallan sometidos a temperaturas y presiones muy altas. En el estudio de esas rocas se apoyan para reconstruir la historia del cambio climático y ambiental de la Tierra. En ese contexto, el análisis de los carbonatos dragados del fondo oceánico ha revelado la edad y origen de las eras glaciales y de las glaciaciones polares. Los estudios de rocas carbonatadas en la transición del Cretácico al Terciario, hace 65 millones de años, cuando los dinosaurios y muchas otras especies de animales y plantas se extinguieron, facilitan la reconstrucción de las condiciones ambientales asociadas con dicha desaparición.

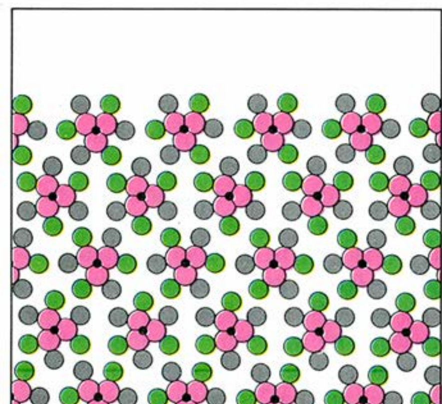
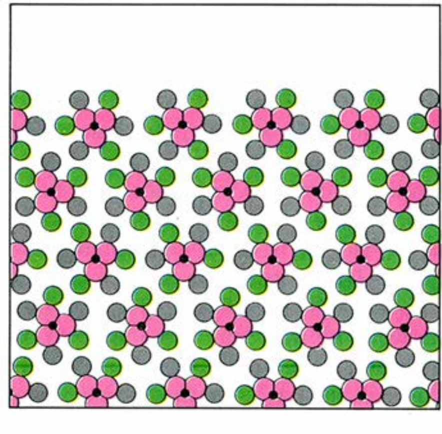
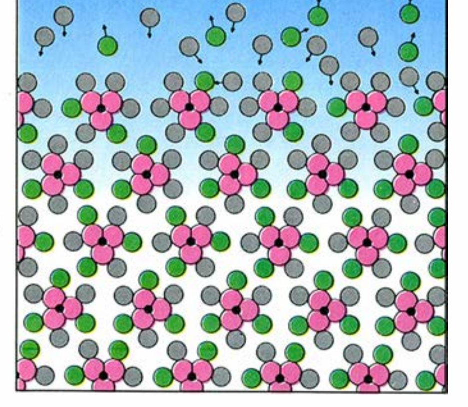
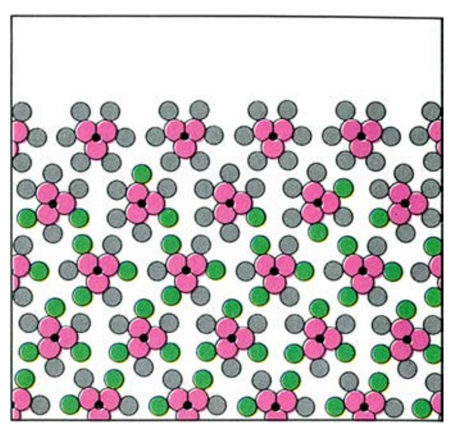
La investigación de los minerales carbonatados, amén de ofrecernos pistas sobre la historia de la Tierra, nos descubre también el origen de las muestras rocosas. Las proporciones de los diversos isótopos estables del carbono y el oxígeno varían en la caliza y el mármol, de acuerdo con la procedencia geológica y geográfica de los componentes. Asimismo, los análisis isotópicos aportan claves para descifrar los cambios estructurales y de composición causados por la meteorización y el enterramiento. El método se potencia con otras herramientas, verbigracia, el microscopio de luz polarizada, que muestra las alteraciones sufridas en la estructura mineral, y las microsondas de electrones, que excitan las muestras de roca con radiaciones de alta energía de electrones. La frecuencia de los rayos X que las muestras emiten en respuesta a la excitación se analizan para determinar las concentraciones de elementos traza.

Idénticos instrumentos y principios científicos pueden aplicarse a las esculturas de mármol. Aunque los cambios geológicos se desarrollan a lo largo de millones de años y la meteorización de una escultura marmórea ocurre, por contra, en unos pocos miles de años, los procesos básicos son los mismos. Más aún, tales cambios progresan con mayor rapidez en tierra que en el océano, medio éste de extraordinaria estabilidad. Los ambientes terrestres varían más; la lluvia y el agua del suelo son muy corrosivos en las rocas carbonatadas. Resulta inmediato que una explicación pormenorizada de la meteorización sufrida por las esculturas de mármol contribuiría al conocimiento de los cambios experimentados en rocas marmóreas que podrían acompañar a procesos tales como la variación climática, que acontece en pequeños intervalos de tiempo.

Nuestra incursión en el mundo del arte comenzó en el verano de 1984. El Museo Getty había puesto en marcha un proyecto para salvaguardar su extensa colección de mármoles franceses e italianos de los siglos XVII y XVIII contra la acción de los terremotos que sacuden frecuentemente Malibú. Se abrieron pequeños orificios en los objetos de mármol por donde insertar cables de sujeción. El museo decidió analizar los cilindros extraídos para estudiar más de cerca las piezas. Se nos convocó, a mi esposa Karen, experta en microscopía electrónica de barrido, y a mí para identificar los tipos de mármol, su origen y su historia. Era la primera ocasión en que se recurría a las modernas técnicas petrográficas para estudiar mármoles ornamentales. Debimos ofrecer un aspecto insólito con nuestro complejo equipo entre bustos de Luis XIV y cómodas de María Antonieta.

Cierto día, Jerry Podany, restaurador de antigüedades del museo, se nos reunió durante el almuerzo. Mantuvimos una conversación interesante acerca de las investigaciones científicas sobre la autenticidad del mármol. Nos condujo después al sótano del museo y

2. KOUROS GRIEGO de la antigüedad clásica. Se admite que la talla se realizó entre el 540 y el 520 antes de Cristo. Aquí se muestra entero, tras haberse reconstruido a partir de siete fragmentos. Cuando la estatua se ofreció al Museo J. Paul Getty, de Malibú (Calif.), los responsables de la entidad se mostraron cautelosos sobre su autenticidad genuina, tal era su perfecto estado de conservación y también por su estilo ecléctico que parecía combinar rasgos de distintos períodos y regiones. La escultura se talló en dolomita, un tipo de mármol muy estable; ese dato podría explicar su finísima pátina. El kouros mide 206 centímetros de altura.

3. **DESDOLOMITIZACION en representación esquemática. El mármol dolomítico está constituido por cristales de carbonato cálcico-magnésico (*izquierda*). Cuando la superficie queda expuesta al agua intersticial del suelo, que contiene grandes cantidades de iones calcio disueltos, el calcio va sustituyendo gradualmente al magnesio en la dolomita (*centro*). Con el transcurso de los siglos, la superficie expuesta de la dolomita se ha transformado en calcita, carbonato de calcio (*derecha*). A la izquierda se indican los colores de los iones.**

nos enseñó un kouros antiguo; yacía allí, en un habitáculo cerrado, cubierto con una sábana en un furgón almohadillado. Constaba de siete piezas, las mayores correspondían a la cabeza y el torso. La estatua, entera sin duda, se nos mostraba en unas condiciones excelentes de conservación; faltaban sólo las puntas de la nariz y del pene. Cinco de los fragmentos parecían haber sufrido roturas en tiempos pretéritos; las superficies fracturadas estaban recubiertas con una película de taninos rojos que remedaba la pátina de la superficie esculpida. Dos de las fracturas –las que separaban el brazo de la mano derecha– parecían ser recientes, ya que las superficies rotas eran de un blanco níveo.

Podany nos comentó la intención del museo de comprar el kouros. Quería saber antes si había algún test químico o mineralógico que pudiera aclarar la edad e historia de la estatua. Le respondimos que habría que examinarla minuciosamente con el microscopio y que sería preciso analizar muestras líticas antes de poder pronunciarnos. Los dos días siguientes, examinamos la superficie con un estereomicroscopio de alta resolución, lo mismo que hubiésemos hecho en el caso de la "autopsia" geológica de una roca natural. Después del examen inicial, presentamos a Podany y a John Walsh, Jr., director del museo, la necesidad de extraer un nódulo. A los pocos días, el propietario del kouros dio permiso para tomar la muestra. Tras ensayar en otros mármoles, Podany y su equipo, no sin alguna intranquilidad, extrajeron cuidadosamente un cilindro que medía un centímetro de diámetro por dos de longitud de una de las superficies fracturadas antiguas que había por debajo de la rodilla derecha.

En nuestra investigación de la muestra, sólo nos interesaba un aspecto: ¿podría haberse esculpido la superficie entre los años 540 y 520 antes de Cristo, según sugerían los historiadores de arte, o habríase tallado en tiempos más recientes y manipulado luego para dar la sensación de antigüedad? Comenzamos por dividir el cilindro longitudinalmente; cortamos luego una parte en secciones finas longitudinales: obtuvimos vistas de perfil de la superficie exterior meteorizada, la pátina y la transición al mármol fresco del interior. Las secciones se examinaron al microscopio electrónico y microsonda electrónica. Otras muestras se analizaron por espectrometría de masas, difracción de rayos X y fluorescencia de rayos X con el fin de determinar la concentración de distintos isótopos, minerales y elementos traza.

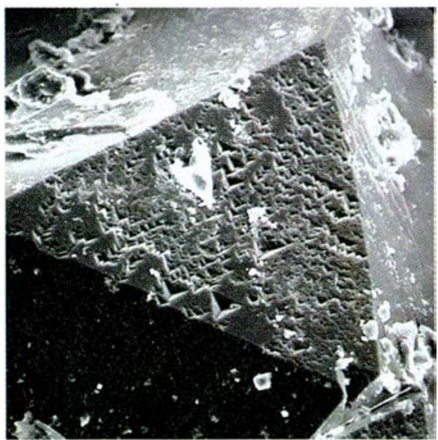
Los exámenes iniciales revelaron que el mármol estaba constituido por una dolomita (carbonato cálcico-magnésico) bastante pura; se trata de una variedad de mármol menos frecuente que los compuestos de calcita (carbonato cálcico). El mármol dolomítico dura más y suele resistir mejor la meteorización que el mármol calcítico, lo que podría explicar la excelente conservación del kouros.

Por norma, el primer paso en un trabajo de autentificación de una obra escultórica consiste en identificar la cantera de donde se sacó la roca. Este punto debe conocerse a menudo con gran precisión, ya que las concentraciones de isótopos del mármol cambian significativamente de un lugar a otro. Cuando los valores isotópicos de dos canteras coinciden, se utilizan pruebas químicas que dirimen la cuestión. El mármol del kouros fue analizado por nuestro grupo, formado por William S. Showers, de la Universidad estatal de Carolina del Norte en Raleigh, y Norman Herz, de la Universidad de Georgia, este último experto en fuentes de mármoles antiguos. En opinión de Herz, el mármol del kouros vendría de las antiguas canteras de cabo Vathy, en la isla de Thasos. Eran las más antiguas proveedoras de mármol dolomítico del área. En Thasos se tallaron grandes kouros durante los siglos VII y VI antes de Cristo.

A pesar de que los análisis evidenciaban un origen verosímil y concedían un contexto histórico para el kouros, no demostraban su edad ni su autenticidad. Todavía se puede trabajar el mármol en Thasos y, aun cuando no quedara mármol en las canteras, cabía la posibilidad de que la estatua se esculpiera con bloques tomados de un yacimiento arqueológico. Por tanto, la cuestión de la autenticidad tenía que resolverse determinando la edad de la superficie tallada.

En el microscopio óptico, la superficie del kouros revelaba una fina pátina marrón de óxidos de hierro y minerales arcillosos del suelo, con incrustaciones de óxidos de manganeso similares a las encontradas en los afloramientos de mármoles antiguos. En la naturaleza, estos minerales proceden del suelo y del agua intersticial. Cuando se examinó la sección cilíndrica, más detenidamente, con la microsonda electrónica, la superficie meteorizada apareció cubierta con una capa conti-





4. LA DOLOMITA DEL KOUROS muestra una estructura cristalina, patente en la microfotografía con luz polarizada (*izquierda*); concuerda con la dolomita de Thasos. La microfotografía de barrido electrónico de una muestra cilíndrica (*derecha*) presenta huecos triangulares, grabados por el contacto con el agua intersticial del suelo, durante mucho tiempo, de la cara de un cristal de dolomita (ampliado en 300 veces).

nua de calcita, de 10 a 50 micras de espesor. La presencia de la calcita se confirmó en los análisis de difracción de rayos X y en los de la microsonda electrónica, realizados por Peter Schiffman, de la Universidad de California en Davis, y por Donald Dietrich y Frank Preusser, en el Instituto Getty de Conservación, instalado en Marina del Rey.

El hallazgo de la capa calcítica en el kouros tenía su interés. La dolomita, es algo sabido, se transforma en calcita durante la meteorización. En este proceso de desdolomitización, los átomos de magnesio que hay en los cristales de dolomita se van suplantando lentamente por átomos de calcio. Es frecuente hallar superficies calcíticas en los afloramientos dolomíticos antiguos que han quedado expuestos a la acción del agua intersticial de baja salinidad o al agua de lluvia, enriquecida en calcio y empobrecida en magnesio. En el kouros, la calcita aparecía en superficies fracturadas que se dirían meteorizadas, pero no en ninguna de las superficies fracturadas con aspecto fresco. Se presume que las superficies fracturadas que presentan una capa de calcita se han visto expuestas a la meteorización en tiempos pretéritos.

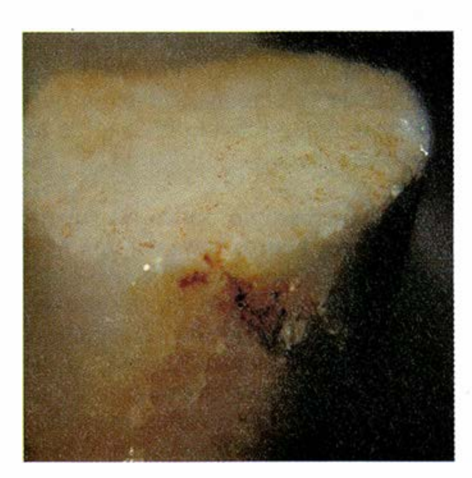
Aplicamos después una ligera capa de acetato diluido en varias superficies esculpidas para sacar réplicas minuciosas de las características de los rasgos superficiales. La capa de acetato levantó también granos de minerales de la corteza, sin deterioro visible de la estatua. Se examinó la capa en el microscopio electrónico de barrido y en la microsonda electrónica. Todas las muestras tomadas de la superficie esculpida tenían idéntica corteza calcítica y los mismos minerales arcillosos, elementos traza y óxidos de hierro que las muestras de la superficie fracturada sometidas a meteorización. La capa de calcita se extendía evidentemente sobre la totalidad de la superficie meteorizada del kouros.

De acuerdo con los datos recogidos en el campo y en los experimentos de laboratorio, sabemos que, bajo condiciones normales en la superficie de la Tierra, la desdolomitización requiere largos períodos de tiempo, de cientos a miles de años. El esfuerzo por acelerar el proceso, calentando, por ejemplo, granos de dolomita a 350 grados Celsius y a 250 atmósferas de presión durante casi todo un año, consigue sólo el cambio de una pequeña fracción de dolomita en calcita y brucita (hidróxido de magnesio), un resultado que difiere del efecto de desdolomitización.

Habida cuenta de que, para convertir, y no sin gran dificultad, trozos minúsculos de dolomita en calcita, se precisa un laboratorio moderno, parecía inconcebible que la calcita del kouros se hubiera creado artificialmente, en una capa uniforme, sobre los dos metros de longitud de la estatua. También parecía inverosímil que se hubiera aplicado una capa de calcita artificial a la roca. El estroncio, el manganeso y otros elementos traza encontrados en la dolomita fresca y en la corteza calcítica eran similares, prueba de que la calcita se desarrolló "in situ".

Llegamos al test crucial: comparar la razón de oxígeno 16 a oxígeno 18 y de carbono 12 a carbono 13, encontrada en la corteza calcítica, con las proporciones que había en la dolomita fresca del interior. Las proporciones resultaron similares, y se asemejaban también a las relaciones medidas en la dolomita desdolomitizada que observamos en la naturaleza. Este hallazgo excluía la posibilidad de que la corteza calcítica del kouros se hubiera creado artificialmente o hubiera precipitado fuera del enterramiento. En cualquiera de ambos casos, los valores isotópicos del oxígeno y del carbono de la corteza hubieran sido muy diferentes de los ofrecidos por la dolomita fresca. La explicación más razonable para la calcita del kouros atribuía su desarrollo a siglos de meteorización.

El espesor de la corteza calcítica no indica, por sí solo, una edad exacta de la superficie esculpida, ya que la tasa de desdolomitización depende de muchas variables desconocidas: profundidad de enterramiento, composición del suelo y química del agua intersticial y de la lluvia en el lugar del emplazamiento. Por lo que se sabe acerca de la desdolomitización, los rasgos superfi-





5. MUESTRA CILINDRICA del tamaño de la goma de un lápiz (*izquierda*). Se extrajo de una fractura meteorizada de la rodilla derecha del kouros. En la corteza calcítica de la superficie expuesta había óxidos de hierro rojos que penetraban profundamente en una fisura. La dolomita fresca es de un blanco níveo. La microfotografía de barrido electrónico (*derecha*) muestra la unión estrecha que existe entre la superficie de calcita con las columnas subyacentes de los cristales de dolomita, ampliados en la figura 1500 veces.

ciales del kouros Getty eran coherentes con una edad de no menos de varios siglos y no más de varios milenios.

Nuestros descubrimientos geoquímicos se sometieron a una revisión científica internacional y a su verificación por parte de laboratorios independientes que desconocían su procedencia. Además, el personal responsable del Museo Getty llevó a cabo un análisis detallado del estilo y comparó la estatua con otros 200 kouros completos o fragmentados. Tras catorce meses de estudios intensos, el museo decidió comprar el kouros. En el otoño de 1986, la estatua se expuso al público. Sostenida internamente por un moderno sistema de prevención de terremotos, con cables de acero inoxidable y muelles de alta tensión, la podemos contemplar erguida y completa, en un aspecto muy parecido al que debió tener en épocas pasadas.



6. "ISLAS DEL MARMOL" del Egeo: Naxos, Thasos y Paros. La Grecia arcaica y clásica y la Roma antigua explotaron el mármol de estas islas mediterráneas, de la península griega, de Anatolia y de Italia. Durante la era mesozoica (hace entre 225 y 65 millones de años), la zona se encontraba sumergida bajo un mar tropical. Los esqueletos de la fauna marina formaron potentes depósitos de carbonato en el fondo marino. Con el tiempo, los depósitos sufrieron metamorfismo y emergieron para formar capas de mármol blanco.

Los métodos empleados en el kouros Getty no pueden aplicarse universalmente para dar fe de autenticidad de todas las esculturas de mármol. Son útiles sólo para mármoles dolomíticos. Los mármoles calcíticos usados en esculturas antiguas, los de Paros, Dolios y Naxos, abundan más que los mármoles dolomíticos. Desarrollan también una capa meteorizada, aunque de manera distinta. Demandan criterios y técnicas analíticas diferentes para establecer su autenticidad.

Cuando un escultor labra una pieza de mármol, los golpes de su martillo fracturan una delgada capa superficial de cristales. Estos cristales rotos dejan que el agua penetre. La calcita es más soluble que la dolomita; por ello, en las superficies esculpidas de calcita, la percolación del agua provoca la recristalización posterior de grandes cristales de calcita en una estructura mucho más fina, llamada micrita (calcita microcristalina). Esta capa micrítica, opaca, se hace más gruesa cuando se expone al ambiente y al agua intersticial.

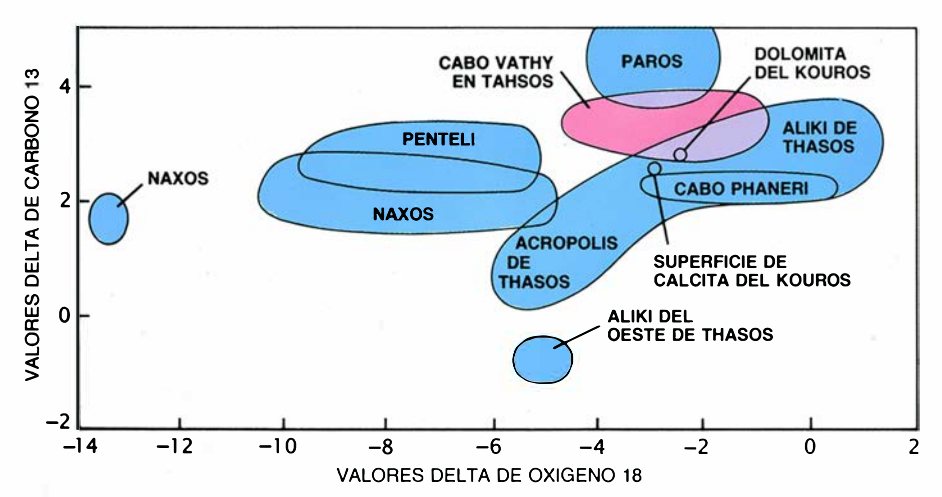
En la calcita meteorizada, la estructura cristalina cambia gradualmente de calcita micrítica de la superficie a mármol fresco del interior. La corteza puede variar de espesor, desde 10 micras hasta más de 10 milímetros, en razón de la extensión de la exposición y de la composición del agua intersticial. La tasa exacta de meteorización depende también del tamaño del cristal y la porosidad intergranular, entre otras propiedades del mármol. La actividad biológica de los líquenes y de las algas en la superficie marmórea podrían, asimismo, desempeñar un importante papel en la formación de la corteza.

Los análisis isotópicos demuestran la existencia de un incremento progresivo en la concentración de los isótopos más ligeros, el oxígeno 16 y el carbono 12, desde el interior del mármol fresco hacia la corteza meteorizada. Estos isótopos abundan más en el dióxido de carbono disuelto en el agua intersticial que en la calcita; de esa suerte, cuando la calcita experimenta una micritización, la micrita viene a enriquecerse en ellos. La tasa de enriquecimiento varía de acuerdo con el espesor de la corteza existente y con la cantidad de los diversos isótopos y minerales presentes en el agua intersticial. Las auténticas esculturas de mármol antiguas se distinguen por su persistente diferencia en la concentración de isótopos de carbono y oxígeno entre el mármol fresco y el meteorizado, cosa que no ocurre en las falsificaciones y las obras recientes.

Los minerales arcillosos y los elementos traza del suelo, como el hierro y el manganeso, se incorporan también en la corteza. Estas sustancias penetran hondamente en la superficie de mármoles antiguos; no son, pues, las impurezas superficiales del objeto que caracterizan a las falsificaciones. Otro rasgo de antigüedad es la presencia de arcillas y líquenes calcificados. Por si fuera poco, las aguas ácidas que actúan durante un período prolongado dejan finas huellas en la superficie, muy bien marcadas; si se intenta imitar esas señales echando ácido en el mármol, las figuras creadas serán distintas.

Hasta hace poco, los restauradores limpiaban las esculturas con ácido, práctica desafortunada que arrancaba la parte meteorizada y que dificultaba la aplicación de estos métodos de autentificación. Más aún. Muchas obras permanecerán abiertas a la duda por siempre, al haberlas limpiado con ácido. Los conservadores actuales suelen mostrarse contrarios a esos procedimientos.

Las técnicas descritas para autentificar esculturas de mármol calcítico se emplearon recientemente en varias piezas dudosas. Una cabeza de Aquiles



7. EN LOS ANALISIS ISOTOPICOS se encontró la llave para certificar la autenticidad del kouros del Museo Getty. La figura ilustra la cantidad de oxígeno 18 y de carbono 13 de diversos tipos de calcita (*azul*) y dolomita (*rojo*), comparados con una muestra estándar; las unidades son valores delta, es decir, divergencias del estándar en incrementos del 0,1 por ciento. Los valores delta más bajos indican concentraciones más altas de los isótopos más ligeros, oxígeno 16 y carbono 12. El análisis muestra que la dolomita del kouros se extrajo de las canteras del cabo Vathy, en Thasos. La superficie de calcita está enriquecida en oxígeno 16 y carbono 12; por abundar estos isótopos en el agua intersticial más que en la dolomita y reemplazar gradualmente a los isótopos más pesados de la roca, resulta verosímil que la costra se desarrollara a través de un proceso de meteorización natural. Debemos a Norman Herz la aportación de los valores de los isótopos.

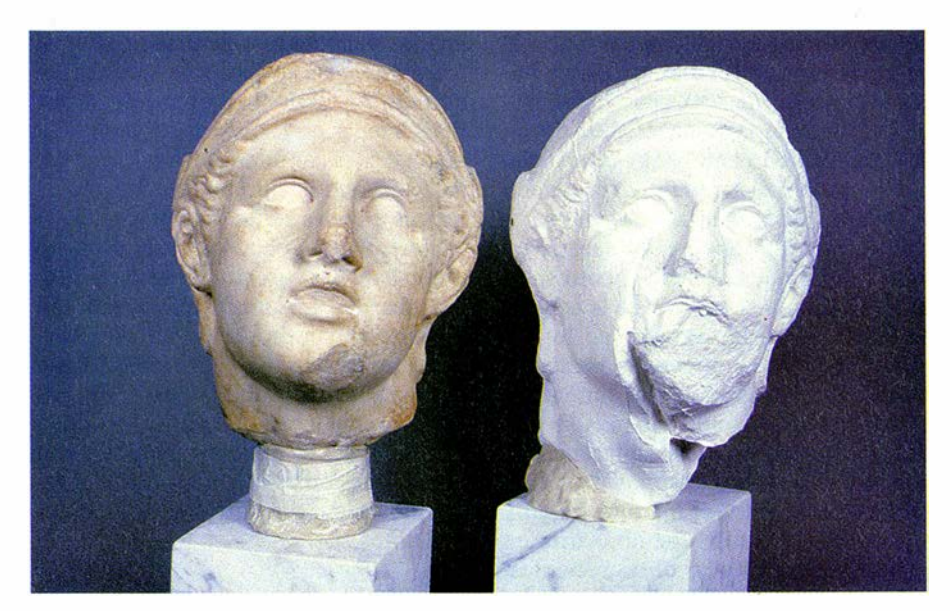
que se había expuesto en el Museo Getty levantó sospechas. Atribuida al escultor griego Skopas, del siglo cuarto antes de Cristo, guardaba un estrecho parecido con otra cabeza, de reconocida autenticidad, del Museo Nacional de Arqueología de Atenas; creíase que procedían del mismo templo griego. Pero el personal del Museo Getty encontró ciertas incoherencias de estilo en su escultura; las medidas demostraron que las dos cabezas eran punto menos que idénticas en todas las dimensiones. Todo sugería que la cabeza Getty se había copiado de la ateniense.

Se tomaron muestras de mármol de las dos cabezas y se analizaron sus isótopos de oxígeno y de carbono en dos laboratorios independientes. Las pruebas revelaron que los tipos de mármol diferían bastante, lo que rebajaba la probabilidad de que la cabeza del Getty fuera genuina. Además, los testigos tomados de la cabeza del museo norteamericano revelaban que la superficie carecía de una capa meteorizada, amén de otros rasgos petrográficos y geoquímicos que cabría esperar de esculturas marmóreas antiguas y pertenecientes a ese período. Considerados en su conjunto, esos indicios señalaban que la cabeza del museo Getty constituía, a buen seguro, una copia realizada en el siglo xx.

En otro caso se trataba de una figura griega de las islas Cícladas: un arpista sentado, propiedad del Museo de Bellas Artes de Virginia en Richmond. La figura se había adscrito al tercer milenio antes de Cristo, pero levantó sospechas ante ciertas incongruencias de estilo y por su insólita corteza de meteorización, con trazas de yeso mineral (sulfato de calcio). Margaret Mayo, responsable de arte antiguo del museo, solicitó a nuestro laboratorio examinar y analizar la pieza.

Descubrimos que el arpista estaba esculpido en mármol calcítico, extraído probablemente de la isla de Naxos, la principal fuente de mármol, quizás, del tercer milenio antes de Cristo. Tenía una gruesa corteza meteorizada, infiltrada por elementos traza de una manera tal que confirmaba una edad de 5000 años. El carbono 13 y el oxígeno 18, por otra parte, eran más abundantes cerca de la superficie que en el interior: el fenómeno inverso de lo que habíamos observado hasta entonces en mármoles calcíticos antiguos, en los cuales los isótopos más ligeros, carbono 12 y oxígeno 16, predominan cerca de la superficie. Sabemos, sin embargo, que en climas áridos, pueden formarse depósitos de yeso y de calcita en la superficie por evaporación de agua intersticial salina y otras sustancias. Tales evaporitas podrían incorporar los isótopos más pesados en la corteza.

Otras esculturas de las islas Cícladas se están examinando y comparando con toda minuciosidad, merced a la labor de un grupo de científicos de varios museos norteamericanos; entre ellos, el de Bellas Artes de Boston, el Metropolitano de Nueva York, el Museo de Arte del condado de Los Angeles y la Institución Smithsoniana. El veredicto sobre la autenticidad del arpista sentado del Museo de Virginia debe esperar los resultados de esa investigación exhaustiva.



8. CABEZA DE AQUILES, propiedad del Museo Getty (*izquierda*), y comparación de la misma con otra del Museo de Arqueología de Atenas, del que se muestra aquí un molde de yeso (*derecha*). Diríase que ambas procedían de un templo de Tegea, pero los análisis isotópicos revelaron que la cabeza del Getty fue tallada en mármol de Paros, mientras que la de Atenas lo fue en mármol Dolios. La cabeza del Getty carecía de una capa meteorizada y otros signos de antigüedad. Se trata, a buen seguro, de una imitación del siglo xx.

A lo largo de los últimos cuatro años hemos avanzado bastante en el conocimiento del proceso de meteorización natural en las tallas marmóreas de la antigüedad. Progresamos con cada análisis científico de nuevas piezas. Las técnicas e instrumentos han mejorado también, hasta el punto de que los exámenes pueden realizarse en muestras del tamaño de una cabeza de alfiler, tomadas de zonas ocultas, incluso, a la vista de los especialistas.

Los directores de museos han terminado por reconocer el valor de las técnicas científicas, no sólo para certificar la autenticidad de esculturas marmóreas, sino también para precisar su datación y asegurar su conservación debida. Hay ya varios museos de Europa y de los Estados Unidos donde se realizan importantes estudios geoquímicos sobre esculturas de mármol. En el curso de esas investigaciones, se han descubierto otras estatuas griegas arcaicas de dolomita de Thasos que presentan pátinas de calcita similares a las observadas en el kouros del Getty. Han sacado a la luz falsificaciones o han probado, en su caso, la autenticidad de objetos que se habían puesto en duda. Hasta los críticos más escépticos están ahora de acuerdo en que los métodos científicos deberían añadirse a los análisis histórico-artísticos y arqueológicos. En este sentido, muchos directores de museos que antaño dudaron de los métodos aplicados al kouros del Getty no se abstienen ya de exhibir la desdolomitización como garantía.

La disciplina que se ocupa de garantizar la autenticidad de las esculturas de mármol antiguas está todavía en sus comienzos. Avanzará a medida que se vaya multiplicando su trabajo de análisis de esculturas dudosas y de las consideradas de probada autenticidad, junto con el examen de muestras de mármoles de distintas edades y tipos, sean de canteras antiguas o modernas. Las nuevas técnicas, refinadas, basadas en isótopos estables o radiactivos, podrían permitir la determinación de la edad absoluta de la corteza meteorizada. Estos estudios no sólo son necesarios para el progreso de este nuevo campo, sino también para asegurar que la ciencia vaya por delante de quienes, para su lucro, falsificarían el patrimonio artístico de la humanidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ISOTOPIC ANALYSIS OF MARBLE. Norman Herz en *Archaeological Geology*, dirigido por George Rapp, Jr., y John A. Giffords. Yale University Press, 1985.

A KOUROS AT THE GETTY MUSEUM. Marion True en *The Burlington Magazine*, vol. 129, n.º 1006, págs. 3-11; enero 1987.

WEATHERING CHARACTERISTICS, AGE, AND PROVENANCE DETERMINATIONS ON ANCIENT GREEK AND ROMAN MARBLE ARTIFACTS. Stanley V. Margolis y William Showers en *Classical Marble*, dirigido por N. Herz y M. Waelkens. Kluwer Academic Publishers, 1988.

THE GETTY MUSEUM KOUROS: ANALYSIS, AUTHENTIFICATION AND CONSERVATION. Jerry Podany et al. J. Paul Getty Museum Press, en prensa.

Absenta

La comprobación de la toxicidad de este licor verde-pálido acabó con el consumo desmesurado del mismo a finales del siglo pasado. La historia de la bebida, sin embargo, comenzó mucho antes del siglo XIX

Wilfred Niels Arnold

Vincent van Gogh se disparó un tiro en la tarde del 27 de julio de 1890 en Auvers-sur-Oise, Francia, muriendo de madrugada dos días más tarde. Paul F. Gachet, el doctor que atendió a van Gogh durante los dos últimos meses de su vida, plantó una tuya en la tumba del artista. El gesto probablemente estuvo inspirado en la admiración de van Gogh por esos árboles y su tendencia a incluir imágenes en forma de llama en algunos de sus cuadros de Auvers.

La elección de Gachet de este ornamento funerario fue involuntariamente patética. La tuya es una fuente clásica de la tuyona química, un constituyente y de hecho el principio tóxico de la bebida alcohólica conocida como absenta. Hay muchas pruebas que indican que van Gogh fue adicto a la absenta y que su psicosis se exacerbó por la intoxicación de tuyona, sufriendo alucinaciones que contribuyeron a su suicidio.

Van Gogh no estuvo solo en su afición por la absenta. La bebida gozó de amplia aceptación popular a finales del siglo XIX, sobre todo en Francia. Los soldados franceses que lucharon en Argelia en la década de 1840 fortalecían su vino con extracto de ajenjo (aparentemente para evitar las fiebres), y a su vuelta a Francia, esta costumbre adquirida fue sustituida por la absenta, que contenía una variedad de aceites esenciales que incluían el del ajenjo. La popularidad que tuvo la absenta entre los soldados se extendió entre sus compatriotas de todos los estamentos sociales; algunas de las personas más creativas de esa época fueron devotos suyos. Se decía que la absenta evocaba visiones nuevas, experiencias diferentes y sensaciones únicas.

WILFRED NIELS ARNOLD es profesor de bioquímica en la facultad de medicina de la Universidad de Kansas. Nacido en Brisbane, Australia, comenzó su formación en la Universidad de Queensland, la prosiguió en la de California en Los Angeles y obtuvo su doctorado por la de Cornell en 1962. Su investigación bioquímica se centra en las levaduras, pero entre sus intereses vocacionales, que le motivaron a escribir este artículo, se encuentran la historia de la medicina del siglo XIX y la historia del arte.

Podía también destruir el cerebro de los bebedores. La enfermedad llamada *absentismo* fue reconocida en los años cincuenta del siglo pasado; sus víctimas daban muestras de aturdimiento y debilitamiento intelectual; experimentaban, asimismo, alucinaciones espantosas. Los síntomas y el alcance del daño por una excesiva ingestión de absenta no se podían atribuir exclusivamente al alcohol. Otros productos químicos dañinos provenían de las hojas y flores empleadas en la preparación de la bebida. Pero los fabricantes, el gobierno y el público, aferrados a las ganancias, ingresos por impuestos y efectos estimulantes respectivamente, tardaron en prestar atención a las señales admonitorias. No se prohibió la absenta hasta el siglo XX.

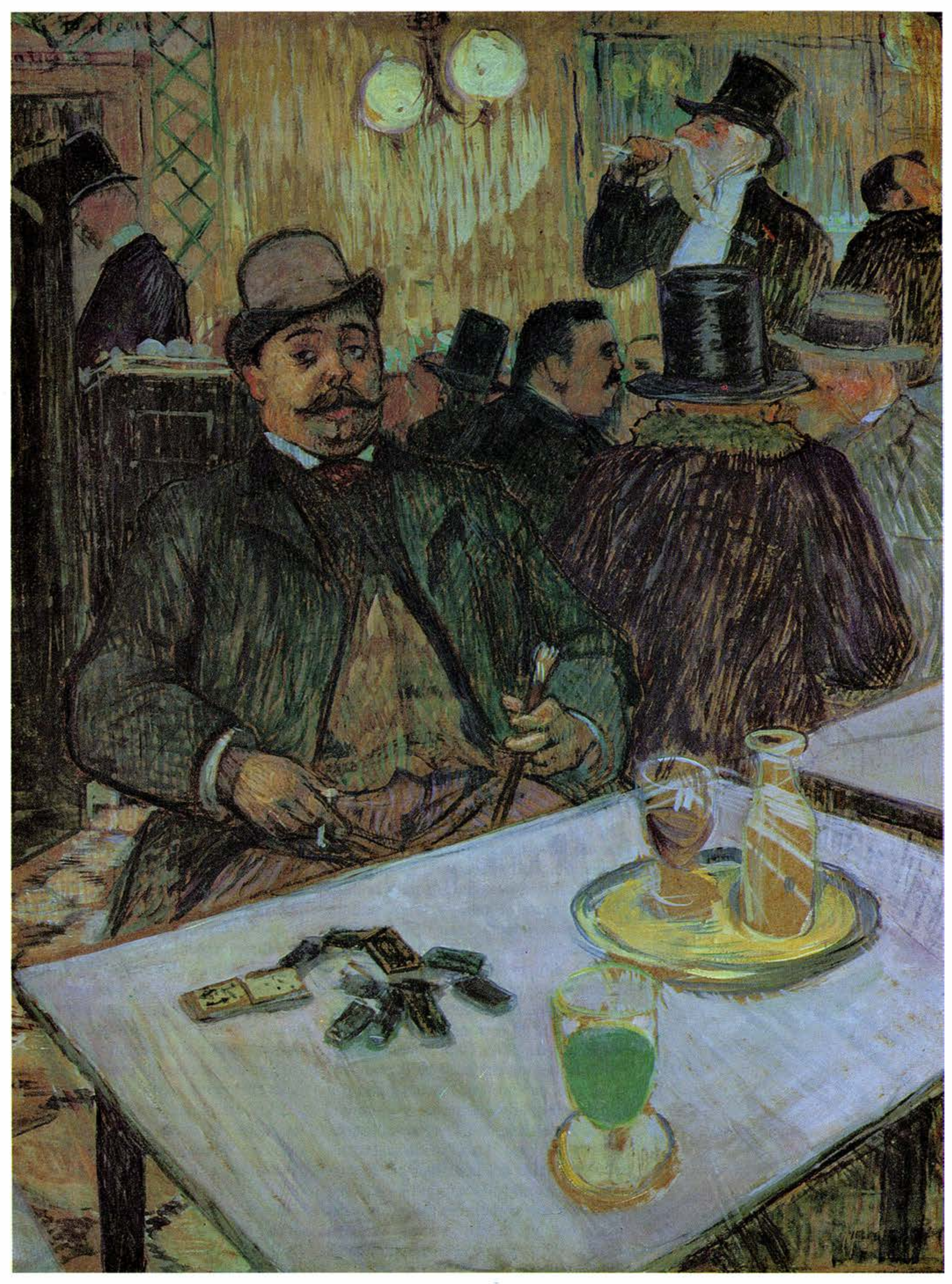
Puede haber una razón más sutil en la resistencia a abandonar el consumo de este licor. Algunas de las plantas que dieron a la absenta su sabor característico provenían del conjunto de remedios vegetales tradicionales; se habían utilizado durante miles de años con resultados a menudo satisfactorios, algunas veces inocuos y rara vez perjudiciales. Incluso después de la caída en desgracia de este licor, las investigaciones sobre la composición química y los efectos fisiológicos de sus componentes, así como de otros productos químicos relacionados con ellos, contribuyeron a una mejora de la práctica médica y al desarrollo de drogas eficaces.

La tuyona se encuentra en diversas plantas, entre ellas el tanaceto (*Tanacetum vulgare*) y la salvia (*Salvia officinalis*). Se da también en todos los árboles del grupo arbor vitae, al que pertenece la tuya occidental (*Thuja occidentalis*). Es característica de la mayoría de las especies del género *Artemisia,* de las Compuestas, la familia de las margaritas. El ajenjo (*Artemisia absinthium*) y el ajenjo romano (*Artemisia pontica*) fueron las principales fuentes de la tuyona en la absenta.

El ajenjo (en francés, *absinthe;* en alemán, *Wermut*) es una planta herbácea con un sistema de raíces perenne, del cual crecen tallos rígidos ramificados y foliosos que son casi leñosos en la base y alcanzan una altura de medio metro a un metro. Sus flores son pequeñas, amarillo-verdosas, globulares. Sus hojas divididas tienen un brillo gris metálico [*véase la figura 2*]. Se cultivó desde la Edad Media hasta principios del siglo XX.

El primer dato sobre el uso del ajenjo proviene del papiro de Ebers, fechado en 1550 a. de C., si bien incluye noticias que datan de 3550 a. de C. Para los egipcios, el ajenjo, o una especie muy cercana, encerraba un significado religioso y medicinal. El "ajenjo", que se menciona siete veces en la versión del Rey Jaime de la Biblia, no fue probablemente *Artemisia absinthium*, sino *Artemisia judaica.* La *Historia Natural* de Plinio, escrita en el siglo I d. de C., atribuye, ya entonces, una gran antigüedad a los extractos de ajenjo y comenta que desde hacía mucho se recetaba contra las lombrices gastrointestinales (de aquí su nombre popular inglés: wormwood = ajenjo; worm = lombriz). La tuyona aturde efectivamente a las lombrices, que a continuación se expulsarán mediante la acción peristáltica normal del intestino.

El ajenjo recibió una descripción exhaustiva en la *Materia Médica* de Dioscórides, un libro de gran prestigio, culminado el año 65 d. de C. y considerado la autoridad máxima en farmacia durante los 1500 años siguientes. Plinio y Dioscórides mencionaron distintas



1. EN PINTURAS SOBRE ESCENAS DE CAFE de la Francia finisecular suele aparecer la absenta formando parte de la vida social. Véase un vaso de ese licor en el cuadro de Henri de Toulouse-Lautrec de 1893: *El señor Boileau en el café*. Pablo Ruiz Picasso pintó un cuadro y una acuarela sobre el tema.

aplicaciones además de sus propiedades antihelmínticas. La unción de brazos y piernas con el zumo de la planta contribuía a repeler los mosquitos y pulgas; y si se guardaban las prendas de vestir con hojas de esta planta, no se apolillaban. Además de estas "virtudes", que han sido comprobadas, esos autores añaden otra serie de propiedades que no han podido corroborarse.

Plinio cita también un vino conocido como "absinthites", enriquecido con extracto de ajenjo. Desde el siglo I al XV, sin embargo, se cree que la utilización de ajenjo, tanaceto y otras plantas como aditivos para las comidas y bebidas se basaba en su sabor característico, más que en su capacidad de intoxicar. Con el descubrimiento en el siglo XVI de la destilación al vapor (descrita en las obras de Hieronymus Brunschwig, publicadas entre 1500 y 1512), se sustituyeron las decocciones relativamente inocuas por fuertes extractos derivados de las mismas plantas. En el XVII, el tanaceto adquirió fama a través de una comida del mismo nombre; se cocía con huevos y crema de leche. El ajenjo de mar (*Artemisia maritima*) se usó para elaborar cerveza caliente, un tipo de cerveza fuerte, popular en los siglos XVII y XVIII en Irlanda e Inglaterra. Esta cerveza caliente se menciona en *Las alegres comadres de Windsor;* el ajenjo se cita, además, en otras tres obras de Shakespeare.



2. AJENJO, *Artemisia absinthium*. El grabado lo pintó a mano James Sowerby en 1803. El aceite de ajenjo se extraía de las hojas, flores y tallo de la hierba. Daba a la absenta su peculiar sabor amargo. El aceite de ajenjo contiene tuyona, substancia que puede ocasionar alucinaciones, convulsiones y daños irreversibles en el sistema nervioso del hombre.

La producción de alcohol por destilación de cereales fermentados fue el precursor de la invención de los licores. A finales del siglo XVIII se descubrió la fórmula de la absenta en Suiza. La receta llegó a manos de Henri-Louis Pernod, quien en los albores del XIX abrió una fábrica en Pontarlier, Francia. Diversas compañías competidoras se fundaron a continuación en Francia y en Suiza. A lo largo de los 100 años siguientes, la producción de absenta constituyó una industria floreciente.

Se dice que la ruda es la más amarga de las plantas conocidas. Le sigue, muy de cerca, el ajenjo. Debe su amargor a la "absintina" ($C_{30} H_{40} O_6$), compuesto cuya compleja estructura no se conoció hasta la década de los cincuenta. El umbral de amargor para la "absintina" pura es una parte en setenta mil; puede detectarse un gramo en 100 litros de agua.

Para mitigar el sabor amargo de la absenta, se acostumbraba añadir un edulcorante. La elegancia social ordenaba poner un terroncito de azúcar en un tamiz de plata (una cucharada de absenta) que se colocaba en la parte superior de un vaso que contenía una pequeña cantidad de absenta; a continuación, se vertía agua fría sobre el azúcar dentro del vaso. La dilución convertía el verde claro del licor en una opalescencia amarilla. Hombres y mujeres gozaban con semejante ritual de presentación, no menos que con la prestancia, sabor y propiedad estimulante del licor.

La estética que rodeaba el consumo de absenta se explica en parte por el aura en que se vio envuelta muy pronto. En la atmósfera alegre de recuperación que siguió a la guerra francoprusiana (1870-1871), "*L'heure-verte*" (la hora verde) se convirtió en un acontecimiento diario institucionalizado; algunos clubes y cafés parisienses se dedicaron exclusivamente a esa bebida. Imágenes de la absenta han quedado inmortalizadas en *La bebedora de absenta* de Edouard Manet (1859), *La absenta* de Edgar Degas (1876) y la pintura a pastel de van Gogh con un vaso de absenta realizada por Henri de Toulouse-Lautrec, terminada en 1887, año en que el propio van Gogh pintó su *Naturaleza muerta* con un vaso de absenta y una garrafa.

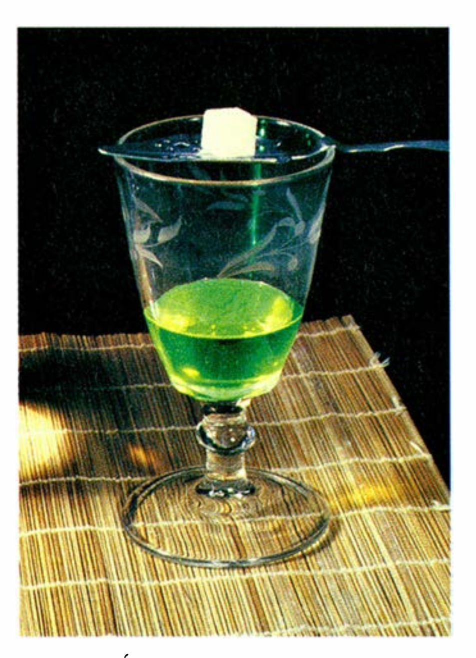
El trabajo gráfico, mordaz, de Honoré Daumier abordaba este tema acompañado de comentarios sociales; así, en las litografías tituladas "Cerveza-nunca... se necesita absenta para resucitar a un hombre" y "Absenta... el primer vaso... el sexto vaso..." que se publicaron en *Le Charivari* en 1863. *Los bebedores de absenta,* lienzo de 1881, de Jean-François Raffaelli tiene matices que son más suaves que depresivos, con su par de vasos opalescentes. Pablo Picasso pintó *El bebedor de absenta* en 1901 y la acuarela *El poeta Cornuty* (*El ajenjo*) en 1903. Once años más tarde realizó una escultura con seis vasos abstractos de metal y cerámica coronados con cucharas de absenta, una respuesta del artista a los proyectos legislativos en favor de la prohibición de la absenta en Francia.

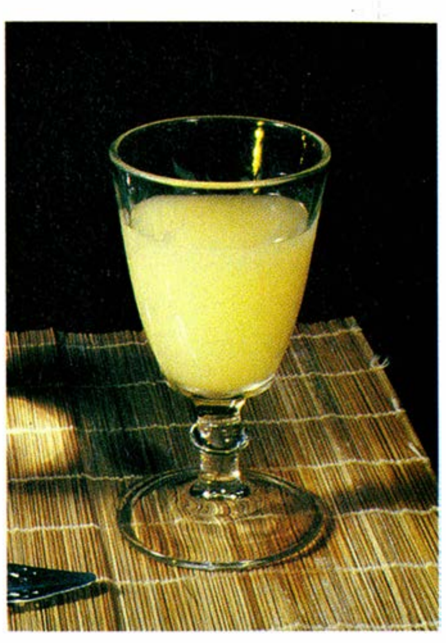
Charles Baudelaire, poeta y amigo íntimo de Manet, incluyó la absenta en su lista de vicios. Aconsejaba "estar siempre borracho" y precisaba, algunas líneas más adelante, "con vino, con poesía o con virtud, como te plazca", lo que da una imagen más saludable de la que típicamente se atribuye al autor. Paul Verlaine solía esperar la visita de la inspiración ante un vaso de vino y luego escribía armonizando tonos agresivos, rudos y sensuales en un mismo verso. Arthur Rimbaud, cuya brillante carrera poética acabó a sus veinte años, pasó ebrio gran parte de su breve vida.

El poeta inglés Ernest Dowson creó un juego de palabras de ribetes afrodisiacos. Transformó el refrán inglés: "Absence makes the heart grow fonder" ("Con la ausencia el corazón se ablanda") en "I understand that absinthe makes the tart grow fonder" ("Con la absenta el pastel es más dulce"). El enigmático dramaturgo surrealista Alfred Jarry insistía en que la in-

teligencia racional era inferior a las alucinaciones y confiaba en la absenta para asegurarse su buena dosis de ellas. En las cafeterías de la calle Seine, Guillaume Apollinaire, poeta y amigo de Picasso y de Gertrude Stein, sucumbió al encanto de los dos, de Jarry de la siempre presente absenta.

A pesar de la veneración por la absenta, que dominó toda esa época artística, uno se pregunta hasta qué punto se abrieron las "puertas de la percepción" para esta sociedad creativa (tomando la expresión del ensayo de Aldous L. Huxley de 1954). Los artistas no estaban siempre embriagados, y de hecho hay pruebas suficientes de que las obras, reputadas sobresalientes, se crearon, por lo común, en momentos de lucidez. Por otra parte, las nuevas experiencias sobre los tamaños, formas y colores percibidos bajo la influencia de la absenta podrían haber sido recogidas posteriormente e incorporadas en un nuevo estilo de relatar, en una nueva paleta o composición.

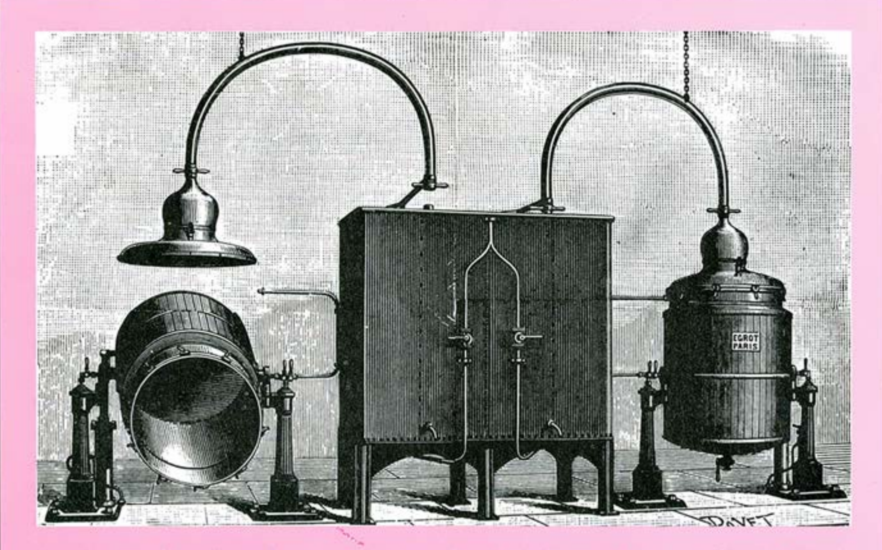




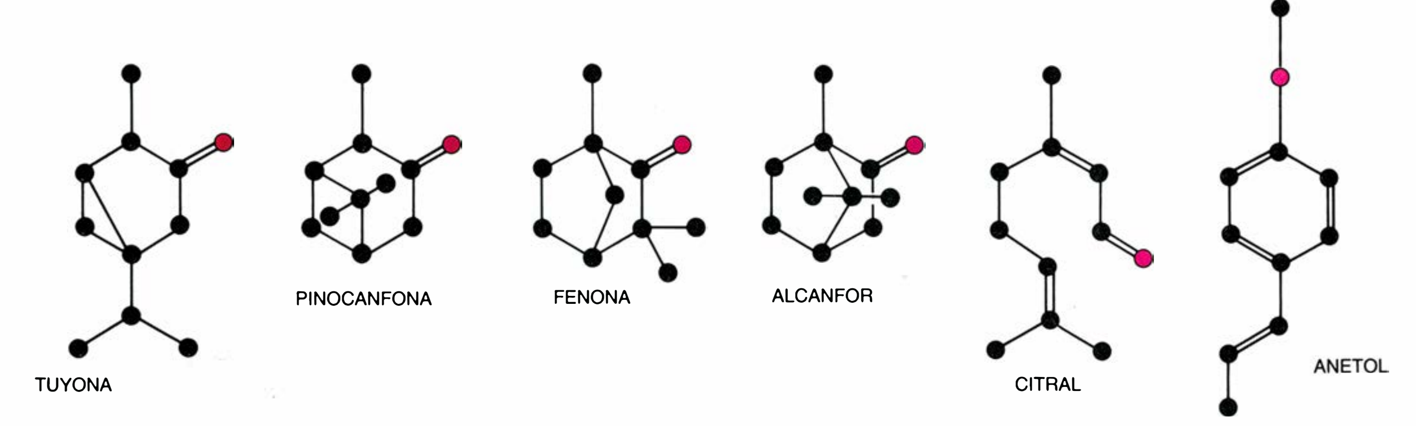
3. **DILUCIÓN DE LA CONCENTRACION** de alcohol de la absenta: producía la precipitación de una suspensión coloidal de terpenos, uno de los cuales es la tuyona. El ritual de presentación consistía en verter agua fría sobre un terroncito de azúcar colocado sobre una cucharita-tamiz. (El azúcar enmascaraba el sabor amargo del licor.) Hoy día se puede conseguir el mismo efecto visual diluyendo un sustituto no tóxico, el "pastís". El autor lo demostró con Pernod. (La prosopopeya de su consumo constituyó un acto social.)

El aceite de ajenjo y el alcohol constituyen los ingredientes básicos de la absenta. El sabor y color de la bebida se potenciaban con extractos de varias plantas: anís, hinojo, hisopo, melisa (bálsamo de limón) y, en menor proporción, angélica, díctamo de Creta, enebro, nuez moscada, anís estrellado y verónica, por citar sólo algunos. Las especialidades variaban según la región y la destilería. El procedimiento general para la obtención de absenta consistía en empapar la mezcla de hierbas en una solución alcohólica de alta graduación y destilar después el alcohol juntamente con los constituyentes volátiles. Se fabricaba también añadiendo aceites esenciales al alcohol de cereales, un método más conveniente para el brebaje que se demandara. El inglés George Saintsbury, crítico literario y comentarista de finales de siglo sobre vinos y licores, dejó escrito que "casi todos los farmacéuticos franceses, en cada una de las pequeñas ciudades, tenían un licor de su invención que era excelente estomacal, amén de otras cosas".

El alto contenido en etanol de la absenta no era su mayor amenaza contra la salud. Se diluía en agua. La concentración de alcohol en la absenta diluida no superaba la habitual en las bebidas que contenían brandy, whisky, ginebra o ron. La principal función de la concentración alcohólica era mantener los aceites esenciales en solución. La *louche,* o turbidez resultante de la dilu-



En la producción de la absenta durante la segunda mitad del siglo XIX se usaron grandes alambiques, similares a la pareja que se muestra en el dibujo. Una receta de 1855 que procede de Pontarlier, Francia, da las siguientes instrucciones para hacer absenta: macerar 2,5 kilogramos de anís y 5 kilogramos de hinojo en 95 litros de etanol de 85°. Dejar la mezcla reposar al menos 12 horas en un recipiente de doble caldera. Añadir 45 litros de agua y calentar; recoger 95 litros de destilado. En 40 litros de destilado añadir 1 kilogramo de ajenjo romano, 1 kilogramo de hisopo y 500 gramos de bálsamo de limón, todo lo cual ha sido previamente secado y cortado finamente. Extraer a una temperatura moderada, luego decantar el licor, filtrarlo y añadirlo de nuevo a los 55 litros restantes de destilado. Diluirlo con agua para obtener aproximadamente 100 litros de absenta con una concentración final de alcohol de 74°.



4. ENTRE LOS COMPUESTOS DE LA ABSENTA encontramos distintos terpenos: tuyona (del ajenjo), pinocanfona (del hisopo) y fenchona (del hinojo). Estos compuestos son cetonas e isómeros estructurales del alcanfor ($C_{10}H_{16}O$). El citral aldehído alifático ($C_{10}H_{16}O$), que es otro terpeno, proviene de la melisa. El hinojo y el anís contribuyen también con un eter aromático llamado anetol ($C_{10}H_{12}O$). Los átomos de carbono aparecen en color negro; los de oxígeno, rojo.

ción, la producían los terpenos de la absenta, que afloran en la solución cuando se rebaja la concentración de alcohol y forman una suspensión coloidal. Estos terpenos incluían tuyona, fenona, pinocanfona y citral [*véase la figura 5*]. Los métodos modernos de análisis, que emplean cromatografía en fase gaseosa, acompañada de espectrometría de masas, han identificado varios terpenos más y otros productos químicos en los aceites esenciales que se incorporaban en la absenta.

Algunas partidas de absenta contenían ingredientes dudosos. Mientras que la coloración verde de la absenta preparada debidamente provenía de la clorofila, se denunció en ocasiones la adición de sales de cobre en partidas de inferior calidad para aumentar ese cromatismo. A tenor del color y la solubilidad, el adulterante más probable solía ser el acetato cúprico. Otros informes apuntaban a la contaminación ocasional con metanol y alcoholes de mayor graduación que el etanol, aunque lo mismo se podría decir de otros licores. El hallazgo de antimonio en algunas partidas mereció una reseña médica en el *Lancet* de 1873, donde se sospechaba, con mejor intención que acierto, que el tártaro emético se añadía también con la misión de restar toxicidad a la bebida. Esta sal, sin embargo, es escasamente soluble en alcohol. Candidato más idóneo es el tricloruro de antimonio. Este compuesto venenoso es soluble en alcohol y produce una precipitación cremosa en dilución con agua; se añadía, muy probablemente, para conseguir un mejor efecto de turbidez.

Tales procedimientos incorrectos aumentaban el peligro para el consumidor de absenta, porque hasta la "mejor" absenta resultaba así bastante tóxica. Algunos de los primeros herbolarios desaconsejan ya un consumo excesivo, pero es el *De venenis* de Johan Lindestolophe, publicado en 1708, el que afirma rotundamente que el uso continuado de *Artemisia absinthium* provoca un "severo deterioro del sistema nervioso". El autor y su comentarista Christianus Stenzelius dieron fe de los efectos narcóticos y debilitantes de dicha hierba por propia experiencia.

En 1859 Auguste Motet presentó su tesis doctoral en medicina "Sobre el alcoholismo y los efectos venenosos producidos en el hombre por el licor de absenta". Este título fue profético, mas, habida cuenta del medio en que se difundió el aviso, no alcanzaría la audiencia que se merecía. En 1864, sin embargo, una de las principales revistas del momento publicó una breve reseña en la que Louis V. Marcé, de la Bicêtre, el famoso hospital de París, describió experimentos con perros y conejos a los que se les había administrado esencia de absenta. Los animales así tratados padecieron convulsiones, evacuaciones involuntarias, respiración anormal y espumarajos. Marcé comparó estos síntomas con los experimentados por los bebedores de absenta. Entendió cabalmente la doble acción de la intoxicación por absenta: los efectos independientes causados por el alcohol y la tuyona.

El discípulo y colaborador de Marcé, Valentin Magnan, prosiguió en esa línea de investigación en el asilo de Sainte Anne, centrando su atención en los distintos efectos originados por la absenta y los ocasionados por el alcohol solo. Magnan y sus colegas observaron que la absenta provocaba alucinaciones (auditivas y visuales) en el hombre; las indujeron también en animales de laboratorio. Los perros tratados con absenta se encaraban ante una pared blanca como si se enfrentasen contra enemigos imaginarios. Una sola dosis, aunque bastante elevada, causaba convulsiones semejantes a las de la epilepsia. El aceite de ajenjo reprodujo los síntomas característicos de la intoxicación por absenta; experimentos controlados detectaron otras esencias en la absenta.

La edición de 1865 del *Dictionnaire de Médecine,* de M. P. Emile Littré y Charles P. Robin, catalogaba la intoxicación por absenta entre las formas de alcoholismo, si bien destacaba que los efectos neurológicos especiales debían atribuirse a causas distintas del alcohol. En 1868 Robert Amory, discípulo de Magnan, preparó un resumen sobre la intoxicación por absenta para el *Boston Medical and Surgical Journal,* convertido hoy en el *New England Journal of Medicine.* En 1874, Magnan revisó sus escritos sobre el tema en el *Lancet.*

Las recomendaciones de los científicos llegaron, por fin, a la prensa popular, aunque acompañadas de los desmentidos de quienes tenían intereses económicos en el licor. Los hombres y mujeres que vivieron el período de la revolución industrial disfrutaban de los efectos liberadores de la absenta e intentaban autoconvencerse de que los riesgos eran menores. La reacción del consumidor en el cambio de siglo iba de cierta moderación en la bebida a un completo desdén por las prevenciones médicas que se habían manifestado en contra de las mismas.

De 1875 a 1913, el consumo anual de absenta por habitante se multiplicó por quince en Francia, donde se bebieron unos cincuenta millones de litros de absenta ese último año. Había diferencias

regionales: en Arles y aledaños, por ejemplo, la proporción cuadruplicó la media nacional. Las estadísticas mostraban correlaciones significativamente positivas entre el consumo de absenta per cápita por región y la frecuencia de trastornos neurológicos, nacimientos de niños muertos y exenciones del servicio militar por psicosis. Se achacaron también delitos atroces a la intoxicación por absenta.

Diversos intentos de reducir el consumo de absenta con subidas de los impuestos resultaron estériles. En 1912, el gobierno francés exigió que las concentraciones de alcohol y aceites esenciales se rebajaran. Los consumidores se limitaron simplemente a modificar la proporción de agua en la absenta. La venta libre de esencias y ajenjo en polvo bajo distintos nombres comerciales y la disponibilidad de alcohol barato (y posiblemente alterado) deturparon la aplicación de la norma. La prohibición de la venta y fabricación de absenta en Francia se formalizó en 1915, pero hubo alguna vacilación y la prohibición no se llevó a la práctica hasta algunos años más tarde. En Bélgica, Suiza, Estados Unidos e Italia se tomaron medidas similares entre 1905 y 1913.

En 1901 Raoul Ponchon, mundano comentarista de la vida social parisiense, escribió el poema *La absenta y el conejillo de Indias* a raíz de la publicación de los trabajos del subdirector del laboratorio municipal, que había inyectado a un animal 10 mililitros de absenta para demostrar la toxicidad mortal de la bebida favorita del poeta. La prueba "científica" se había realizado con el propósito expreso de conseguir un efecto contundente, más que con la voluntad de crear un simulacro exacto del hábito humano. El poeta recogió, sin embargo, el envite de la dosis y resaltó que él tendría que beber un litro del brebaje de una vez para conseguir una borrachera semejante a la experimentada por el infortunado animal.

Aunque el escepticismo de Ponchon perdía fuerza conforme el poema avanzaba, su arranque daba en la diana: no se sabía con certeza qué cantidad de absenta resultaba perjudicial. La relación dosis-respuesta en el ser humano era difícil de establecer con los datos disponibles. El borracho ocasional experimentaba alucionaciones en el caso de intoxicación aguda; el crónico sufría daños cerebrales irreversibles cuya severidad dependía de la cantidad de absenta y de la frecuencia del consumo,

La concentración de etanol en las bebidas espiritosas se expresa habitualmente en porcentaje o graduación. Una solución de 70° consiste en 70 volúmenes de etanol puro convertidos en 100 volúmenes de solución mediante la adición de agua; porque, debido a la interacción entre las moléculas de etanol y agua, se deben añadir 33,4 volúmenes de agua en vez de 30. El medio más práctico para determinar las concentraciones de alcohol en las bebidas espiritosas comercializadas es el alcoholímetro, que se muestra aquí, un instrumento perfeccionado en 1824 por Joseph-Louis Gay-Lussac. El milimetrado mide el peso específico del destilado; se hace flotar en una muestra a temperatura determinada, y la profundidad a la cual se hunde indica el porcentaje de alcohol que hay en la solución. El porcentaje o graduación se lee directamente en la escala inscrita en la varilla. Cuando la absenta se popularizó, la concentración de alcohol se expresaba en el antiguo sistema francés de grados, que equivalían numéricamente a los porcentajes en volumen. Los británicos acuñaron el término "proof", su graduación de la bebida, que correpondía a 57,27° por ciento de etanol en volumen, se definió como aquella que, con la concentración máxima de agua, permitiera la ignición tras su mezcla con pólvora. En Estados Unidos el límite se modificó. La graduación es exactamente el doble por ciento en volumen, de modo que el licor que tiene un 50 por ciento la que, con la concentración máxima en agua permitiera la ignición tras su mezcla con pólvora.

amén de la edad, estado de nutrición y salud general. Trastornos estomacales eran propios de los bebedores empedernidos, especialmente en aquellos cuyas dietas eran bastante deficientes.

La estructura química correcta de la tuyona fue publicada en 1900 por el químico alemán Friedrich W. Semmler. Antes de 1916, los científicos europeos y norteamericanos habían identificado su farmacodinámica. El compuesto causa una profunda excitación del sistema nervioso autónomo, con la pérdida consiguiente de la conciencia y convulsiones. Las contracciones musculares involuntarias y violentas son, al principio, clónicas (rápidas y repetidas después de intervalos de relajación) y luego tónicas (continuas y pertinaces). Los efectos de la tuyona vienen a coincidir casi con los del alcanfor. Las convulsiones inducidas por el alcanfor y la tuyona sirvieron de modelo para el estudio de la epilepsia y, así, aparecieron, en las décadas de los veinte y los treinta, varios trabajos de investigación en esa dirección en las revistas de neurología y psiquiatría.

El alcanfor fue utilizado más tarde por László J. von Meduna y sus colegas, del Hospital Nacional de Enfermedades Nerviosas y Mentales de Budapest, en una terapia convulsiva para ciertos casos de esquizofrenia. Las primeras dificultades en la dosificación y los efectos secundarios de las inyecciones intramusculares de alcanfor se evitaron sustituyéndolo, primero, con pentileno tetrazol intravenoso y, luego, con inhalación de éter hexafluoruro dietil. Aunque la terapia electroconvulsiva ha remplazado estos métodos químicos, importa destacar que el efecto beneficioso de tales terapias se logra por la propia convulsión, más que por el componente administrado o la corriente transmitida. En ese ámbito, la tuyona y el alcanfor desempeñaron un papel positivo en la evolución de una valiosa práctica médica.

Desde el siglo I hasta el XVIII, los estudiosos chinos ensalzaron las virtudes de la planta *qing-hao* (*Artemisia annua*) en el tratamiento de la malaria. La eficacia de los brebajes de esta especie se ratificó en 1971; su principio activo se identificaría un año después: se trata de un peróxido de una lactona sesquiterpénica, poco corriente, la qing-haosu. De entonces a hoy se han ido sintetizando los derivados del compuesto más eficaces. Su vigor contra cepas del parásito de la malaria resistentes a cualquier otro producto centra hoy el mayor interés. La malaria era frecuente en la cuenca mediterránea durante el siglo XIX. Por algún tiempo, anduve dándole vueltas a la idea de que quizá las tropas francesas, en la década de los cuarenta del siglo pasado, podrían haber tenido acceso a esta medicina preventiva cuando añadían ajenjo a su ración de vino. Pero se descubrió que *Artemisia absinthium* no contenía suficiente qing-haosu como para ser una fuente importante del compuesto.

Se han elogiado las especies de *Artemisia* por su capacidad repulsiva de insectos, antihelmíntica y antimalaria. La tuyona y su pariente químico el alcanfor participaron en la investigación básica de la epilepsia y la terapia convulsiva de una forma que se juzgó positiva y constructiva. La ingestión de absenta, por contra, se consideró negativa y destructiva. Mirando hacia atrás, la prohibición, aunque tardía, parece plenamente justificada. Se han expresado opiniones contrarias durante los últimos veinte años, pero diríanse basadas en un espejismo romántico. Después de la prohibición de la absenta, se comercializó en Europa un sustituto anisado y sin ajenjo. Se expende con las firmas Ricard y Pernod.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON THE COMPARATIVE ACTION OF ALCOHOL AND ABSINTHE. V. Magnan en *Lancet*, vol. 2 de 1874, n.º 2664, págs. 410-412; 19 de septiembre de 1874.

THE DICYCLIC TERPENES, SESQUITERPENES AND THEIR, DERIVATIVES, vol. 2. John Lionel Simonsen en *The Terpenes*. Cambridge University Press, 1949.

AN ILLUSTRATED HISTORY OF THE HERBALS. Frank J. Anderson. Columbia University Press, 1977.

ABSINTHE: HISTORY IN A BOTTLE. Barbaby Conrad III. Chronicle Books, 1988.

VINCENT VAN GOGH AND THE THUJONE CONNECTION. Wilfred Niels Arnold en *Journal of the American Medical Association*, vol. 260, n.º 20, págs. 3042-3044; 25 de noviembre de 1988.

Taller y laboratorio

Mecánica para alpinistas, o cómo superar el más difícil de los exámenes de física

Jearl Walker

De la escalada libre podría afirmarse que constituye el más difícil de los exámenes de física, ya que aquí la insuficiencia puede suponer la muerte. El mismo "aprobado por los pelos" puede fácilmente acarrear graves lesiones. Se trata de un deporte que exige no sólo fuerza y agilidad, sino también un conocimiento intuitivo de las leyes de la física. Los fundamentos son transmitidos por los instructores a sus discípulos en forma de reglas de cumplimiento bastante sencillo en su mayoría. Sin embargo, la importancia y oportunidad de algunas de esas reglas no son siempre obvias y un principiante puede verse tentado a incumplir alguna que otra.

Supongamos, por ejemplo, que nos hallamos practicando una escalada sin otra ayuda que una cuerda sujeta por un compañero que avanza por encima de nosotros. Nos enfrentamos a un talud o una pared de roca lisa, que se une formando un ángulo obtuso con otra pared de inclinación parecida, de tal manera que la juntura genera una cresta similar a la arista lateral de una pirámide. (Pensemos no en una arista aguda, sino más bien roma, desgastada y tan suave como los dos frentes de los taludes.) ¿Por dónde treparemos con mayor facilidad, directamente por uno de los taludes o bien siguiendo la cresta?

Supongamos, además, que uno de los taludes sea muy escarpado, aunque nos permita no obstante ponernos de pie y, a trancas y barrancas, ascender por la roca. ¿Será menos peligroso inclinarnos hacia adelante y valernos de las manos? ¿Qué hacer si nos encontramos sobre una cornisa inclinada ante otra cornisa de inclinación similar aproximadamente a la altura de nuestra cintura: será más seguro inclinarnos hacia adelante y apoyarnos con las manos en esa cornisa más alta?

Consideremos todavía una tercera situación. A saber, que exista una grieta vertical lo bastante ancha para que podamos "chimenear". (Hacer chimenea o chimenear es introducirse en la grieta apoyando la espalda sobre uno de los costados y apretando con los pies contra el costado opuesto, a la vez que doblamos las rodillas para mantenernos bien encajados.) Para ascender, basta simplemente caminar por uno de los lados de la grieta a la vez que presionamos con la espalda sobre el otro lado. (Podemos conseguir un apoyo adicional, aunque limitado, apretando con las manos contra la pared situada a nuestra espalda, o bien, si la grieta es lo bastante estrecha, contra la pared delantera. E incluso podríamos colocar un pie en cada pared y hacer fuerza hacia abajo a la vez que elevamos el cuerpo.) Dado que la presión contra las paredes ha de ser constante, subir una chimenea larga resulta agotador. Si nos detenemos para descansar, ¿hay alguna posición óptima para nuestros pies, tal que minimice el empuje que hemos de ejercer contra la roca? Al trepar, ¿cómo hay que mover exactamente pies y espalda para reducir el riesgo de resbalar? Supongamos que, a medida que ascendemos, nos encontramos con que la piedra se va haciendo más resbaladiza. ¿Deberemos colocar los pies más arriba o más abajo con respecto al lugar donde empujamos con la espalda contra la roca?

Si, para citar un último ejemplo, la grieta es muy estrecha y una pared sobresale más que la otra, podríamos intentar un "retranqueo" (o "bavaresa"). Para esta técnica es necesario que nos hallemos en el lado de la grieta opuesto al de la pared que sobresale. Introducimos entonces los dedos en la grieta y tiramos hacia nosotros. Seguidamente colocamos un pie en la piedra saledıza del otro lado y apretamos con fuerza. Al tirar con los brazos y empujar con las piernas, la tensión resultante nos estabiliza, pero el esfuerzo es agotador. ¿Cómo colocar brazos y piernas para reducir la fatiga y cómo moverlos para izarnos sin peligro?

Algunos de los fundamentos de estas técnicas los examinaron en 1976 R. R. Hudson, de la Escuela de Tecnología de Darlington, y W. Johnson, del Instituto de Tecnología de la Universidad de Manchester. Todas estas técnicas se basan en el rozamiento entre el escalador y la piedra. Por rozamiento entendemos, claro está, la fuerza que se opone al deslizamiento de una superficie sobre otra, como pueden ser las suelas del escalador y la piedra. Simplificando, podemos formarnos una imagen del rozamiento atribuyéndolo a las pequeñas rugosidades de ambas superficies. Pese a que las dos superficies, en este caso la de una piedra plana y las suelas, parezcan lisas, en ellas hay siempre diminutos valles y crestas. Cuando una fuerza trata de hacer resbalar las superficies una contra la otra, las crestas de cada una de ellas se enganchan con las crestas y valles de la otra. Aparece entonces un efecto combinado de resistencia al movimiento que es lo que constituye el rozamiento.

Antes de ocuparnos de los complicados casos de escalada que estudiaron Hudson y Johnson, examinaremos las fuerzas que intervienen en algunas situaciones comunes, como estar de pie o caminar. Cuando una persona está de pie en el suelo, sobre ella actúan dos fuerzas: el peso, que tira hacia abajo, y otra fuerza, de la misma intensidad que el peso, que ejerce el suelo hacia arriba. Las fuerzas pueden representarse mediante vectores que indiquen su intensidad, dirección y sentido [*véase la figura 1*]. El vector peso se asigna al centro de masa, punto que tenemos situado aproximadamente a la altura del ombligo cuando permanecemos de pie. La fuerza ejercida por el suelo recibe el nombre de fuerza normal, donde el adjetivo "normal" indica que la fuerza es perpendicular a la superficie de apoyo, el suelo en este caso.

Si echamos a andar adelantando un pie, los músculos de la pierna empujan hacia atrás el otro pie que, para no resbalar, debe experimentar un rozamiento que contrarreste exactamente aquel empuje. Ese rozamiento queda representado por un vector paralelo al suelo. Si nos impulsamos con más fuerza y el pie que apoyamos sigue sin moverse, el rozamiento será mayor entonces, pero deberá, como antes, compensar exactamente el impulso. Pero si empujamos con demasiada fuerza, de tal modo que el impulso exceda de cierto valor límite superior propio del rozamiento, las crestas cederán y el pie que apoyamos resbalará. El límite superior de la fuerza de rozamiento está determinado por el producto de la fuerza normal y el "coeficiente de rozamiento", que es una medida de la rugosidad de la suela y el piso.

Como la fuerza normal es igual a nuestro peso, el límite superior de la fuerza de rozamiento depende nada más que del coeficiente de rozamiento. Cuando el coeficiente es alto, como en el caso del hormigón seco, el límite superior es también alto; podremos impulsarnos con mucha fuerza sin llegar a resbalar. Cuando el coeficiente es pequeño, como en el caso de hielo resbaladizo, hasta el más leve empuje hará que patine el pie que apoyamos.

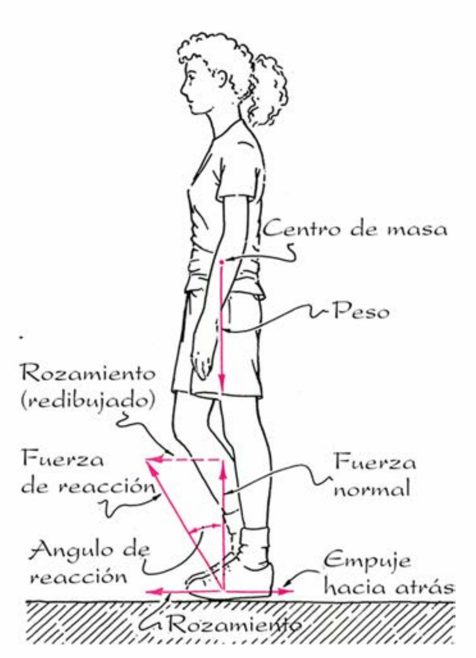
Un procedimiento equivalente para analizar el papel del rozamiento consiste en volver a dibujar los vectores que representan la fuerza de rozamiento y la fuerza normal de tal manera que constituyen los catetos de un triángulo rectángulo. Con ello no varía el valor del rozamiento, puesto que no alteramos esencialmente el vector que lo representa en intensidad, dirección y sentido. De la hipotenusa de ese triángulo rectángulo, que es también un vector, decimos que es la suma de la fuerza normal y del rozamiento y recibe el nombre de fuerza de reacción, o simplemente reacción.

Importa mucho aquí el ángulo que voy a llamar de reacción, entendiendo por tal el ángulo que forman la fuerza de reacción y la normal. A medida que nos impulsamos con más fuerza y aumentamos el rozamiento, el ángulo de reacción aumenta. Cuando este ángulo alcanza determinado valor crítico, el rozamiento ha adquirido su valor máximo y el pie que apoyamos se encuentra a punto de deslizar. Esta situación crítica se presenta cuando la tangente del ángulo es igual al coeficiente de rozamiento. En algunos casos, el ángulo de reacción es más fácil de estudiar que el rozamiento ejercido sobre el escalador, por lo que más adelante retornaremos sobre él.

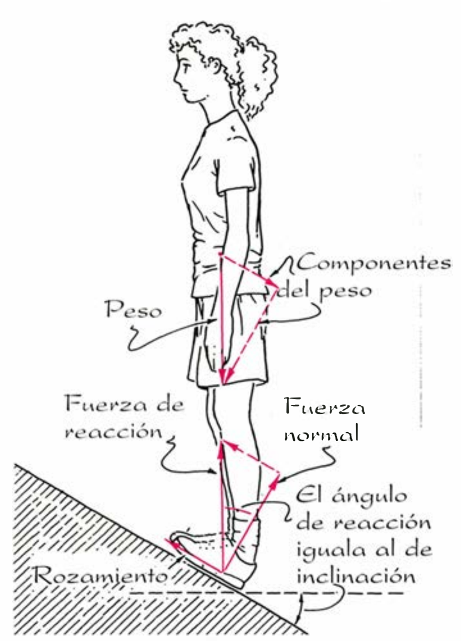
Consideremos ahora las fuerzas que entran en acción cuando estamos de pie sobre una rampa [*véase la figura 2*]. También aquí nuestro peso nos tira hacia la superficie de apoyo y genera una fuerza normal perpendicular a esa superficie, pero en este caso nuestro peso también tira de nosotros hacia atrás. En virtud de este último hecho, en nuestros pies aparece un rozamiento aunque no nos impulsemos con ellos. Una manera sencilla de representar las fuerzas es descomponer el vector peso en sus componentes; una de las cuales es perpendicular a la rampa y se anula con la normal. La otra componente está dirigida rampa abajo, y mientras nuestro equilibrio sea estable tiene que ser contrarrestada por el rozamiento. Aquí también podemos volver a dibujar esta última fuerza de tal manera que entre ella, la normal y la reacción compongan un triángulo rectángulo. En este caso ocurre que el ángulo de reacción es igual a la inclinación de la rampa.

Imaginemos lo que acontece si la inclinación (y por tanto, también el ángulo de reacción) aumenta y nosotros permanecemos de pie. La componente del peso paralela a la rampa crece y automáticamente hace lo mismo el rozamiento que la contrarresta. La componente del peso perpendicular a la rampa disminuye, igual que la normal que se opone a ella. Cuando el ángulo de reacción alcanza cierto valor crítico, el rozamiento llega a su límite superior y estaremos a punto de deslizar. Ese valor crítico establece un límite para la pendiente sobre la que podemos mantenernos de pie sin resbalar.

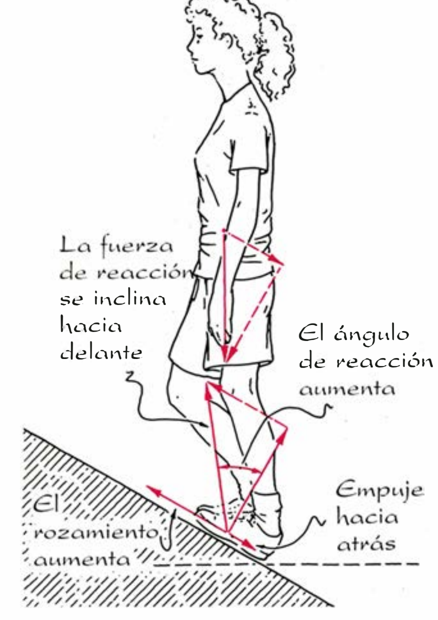
Si la pendiente es moderada y empujamos un pie hacia atrás con el propósito de dar un paso con el otro, aquel empuje está dirigido rampa abajo y requiere que aumente el rozamiento sobre el pie que apoyamos. Esto hace que la fuerza de reacción se aleje de la ver-



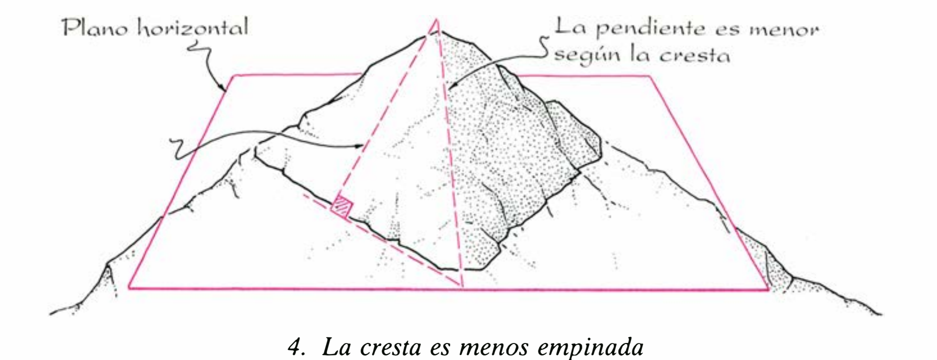
1. Fuerzas que intervienen en el impulso



2. Fuerzas que aparecen en una superficie inclinada



3. Impulso sobre una superficie inclinada



4. *La cresta es menos empinada*

tical, con lo cual aumenta el ángulo de reacción [*véase la figura 3*]. La estabilidad del pie puede describirse en función del rozamiento o del ángulo de reacción. El pie es estable si el rozamiento no excede de su límite superior o bien, dicho de otra manera, si el ángulo de reacción no excede de su valor crítico. Si nos descuidamos y empujamos demasiado fuerte, el pie podrá resbalar aunque la pendiente no sea exagerada.

Conocidos estos hechos, retornemos ahora a las situaciones concretas de alpinismo que hemos planteado al principio. Nos preguntábamos en primer lugar si un talud hay que escalarlo directamente o bien siguiendo la cresta que forma con otro talud de inclinación similar. En uno y otro caso tendremos que mantener siempre el ángulo de reacción por debajo de su valor crítico, que viene dado por el coeficiente de rozamiento entre nuestro calzado y la piedra. El riesgo de resbalar aumenta al adelantar un pie pendiente arriba mientras nos apoyamos en el otro. Para disminuir el riesgo hay que buscar el camino de mínima pendiente, aun cuando pudiéramos ser capaces de mantenernos erguidos en otra pendiente más empinada. Esa pendiente mínima la presenta la cresta. Podemos comprobarlo trazando una recta sobre uno de los taludes de suerte que constituya uno de los catetos de un triángulo rectángulo cuya hipotenusa sea la cresta [*véase la figura 4*]. Por ser más corto ese cateto que la hipotenusa, presentará una pendiente más escarpada.

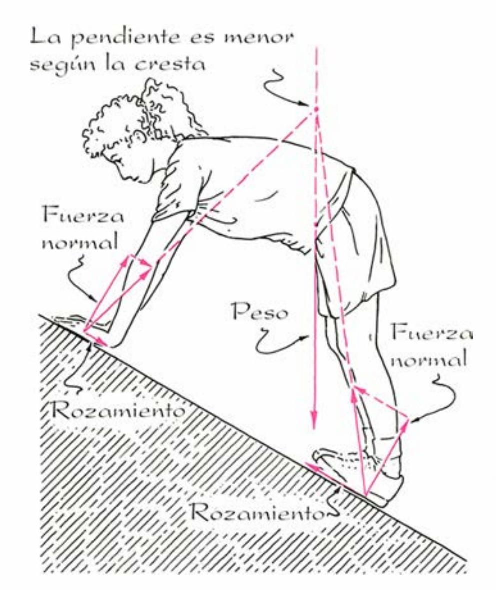
Cuando estamos de pie en una pendiente empinada, ¿hay que agacharse y usar las manos? La mayoría de los instructores de montañismo enseñan que hay que mantenerse de pie siempre que sea posible y que doblar el cuerpo incrementa muchísimo la posibilidad de que nuestros pies resbalen. ¿Están en lo cierto? El rozamiento debe seguir contrarrestando la componente del peso paralela a la pendiente, pero ahora hay rozamiento en ambas manos, además de en los pies. ¿No resulta acaso esto más seguro que mantenerse erguido dependiendo únicamente del rozamiento en los pies?

Hudson y Johnson se ponen de parte de los instructores aduciendo varias razones. Desde luego que nuestras manos estarán sometidas a rozamiento, pero el coeficiente de rozamiento entre la piel y la piedra es bajo, por lo que el límite superior de ese rozamiento será también pequeño. Si las manos nos deslizan, la única fuerza capaz de frenar el resbalón total pendiente abajo es el rozamiento en nuestros pies. Aunque el rozamiento pueda bastar para sostenernos si estamos de pie, cuando nos agachamos pudiera ocurrir que no bastara.

Para aclarar esta conclusión debemos volver a examinar las condiciones de equilibrio e introducir una nueva. Hasta aquí nos hemos ocupado de que se satisfagan tres condiciones. Las fuerzas paralelas a la pendiente deben contrarrestarse; las fuerzas perpendiculares a la pendiente deben contrarrestarse; y el rozamiento no debe rebasar su límite superior o, lo que es igual, el ángulo de reacción no debe ser mayor que su valor crítico. La nueva condición es que se contrarresten los momentos de giro que actúan sobre el escalador. (Por momento de giro de una fuerza entendemos que al actuar sobre el cuerpo esa fuerza tiende a comunicarle una rotación en torno a un cierto punto, o centro de giro.) Para que el escalador esté en equilibrio, los momentos de giro debidos al peso y a las fuerzas de reacción deben contrarrestarse para todos los centros de giro posibles.

Esta condición se simplifica sin dificultad. Por ejemplo, supongamos que el escalador o escaladora se haya agachado hacia adelante y ponga las manos sobre una pendiente uniforme [*véase la figura 5*]. Los momentos se anularán mutuamente si las prolongaciones de los vectores peso y fuerzas de reacción sobre manos y pies pasan por el mismo punto. Para representar la situación empecemos con el vector peso. El peso es vertical y pasa por el centro de masa del escalador, punto éste situado en las cercanías del ombligo (su posición exacta depende de la constitución de cada persona). Tracemos mentalmente una vertical que pase por el centro de masa.

Consideremos ahora las fuerzas de reacción. Si el escalador está en equilibrio, las prolongaciones de esas fuerzas deben encontrarse en algún punto de la recta vertical citada, punto que llamaré de momento nulo, porque el momento de cada fuerza es nulo si el centro de giro lo colocamos allí. Si las fuerzas se encuentran todas en un punto de momento nulo, el escalador se



5. *Fuerzas cuando el escalador se inclina sobre una pendiente*



6. *Inclinación sobre un resalto*

hallará en equilibrio con respecto a la rotación en torno a cualquier otro centro de giro. No pretendo dar a entender que el escalador realice conscientemente un cálculo rápido para comprobar si se cumple esta condición. Lo que quiero decir es que, si no se cumple, el escalador percibe su inestabilidad y tendrá que alterar la distribución de su peso, su grado de inclinación o la tensión de sus músculos al objeto de mantener el equilibrio.

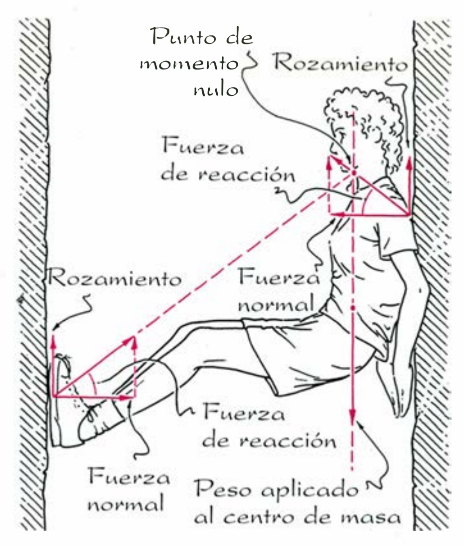
¿Es la posición inclinada que se muestra en la ilustración más segura que una postura erecta? Adviértase que, para el equilibrio frente a los momentos de giro, la fuerza de reacción en los pies debe estar inclinada hacia adelante al objeto de que pase por un punto de momento nulo. Hudson y Johnson aducen que la reorientación de la fuerza de reacción aumenta el ángulo de reacción en los pies y que, si la pendiente es empinada, dicho ángulo puede sobrepasar su valor crítico. Por todo ello el inclinarse hacia adelante es desatinado, aunque haya rozamiento en las manos.

Esta cuestión la he examinado más detenidamente. Supongamos que apoyamos las manos una cierta distancia más arriba de los pies. La suma de los rozamientos en manos y pies debe contrarrestar la componente del peso paralela a la pendiente; pero, ¿cuánto rozamiento hay exactamente en los pies y cuánto en las manos? No es posible contestar a esta pregunta sin conocer los pormenores de la distribución de las fuerzas musculares en el interior del cuerpo. En este caso intervienen cuatro variables diferentes –dos fuerzas normales y dos de rozamiento–; ahora bien, disponemos de sólo tres ecuaciones relativas al equilibrio de fuerzas y momentos. Tres ecuaciones son insuficientes para determinar cuatro variables. Si nos apoyamos con las manos sobre la pendiente, no existe procedimiento práctico para predecir cuánto rozamiento se ejerce sobre nuestras manos y cuánto sobre nuestros pies.

Pero todavía identifiqué un peligro más en el acto de inclinarse sobre la pendiente. Supongamos que las manos las colocamos a una buena distancia de los pies. Para que la fuerza de reacción que actúa sobre las manos pase por un punto de momento nulo, el rozamiento en ellas debe estar dirigido pendiente abajo. Esto, a su vez, requiere que el rozamiento en los pies sea aún mayor que cuando estabámos erguidos, ya que ahora deberá contrarrestar la componente del peso paralela a la pendiente y además el rozamiento en las manos. La situación no parece menos peligrosa si el escalador se inclina hacia adelante para colocar las manos en una cornisa inclinada situada más o menos a la altura de las caderas. En los dos casos el peligro disminuye si las manos se mantienen bajas y la inclinación es pequeña, pero como norma el escalador debe obedecer a su instructor y evitar inclinarse completamente sobre el peñasco.

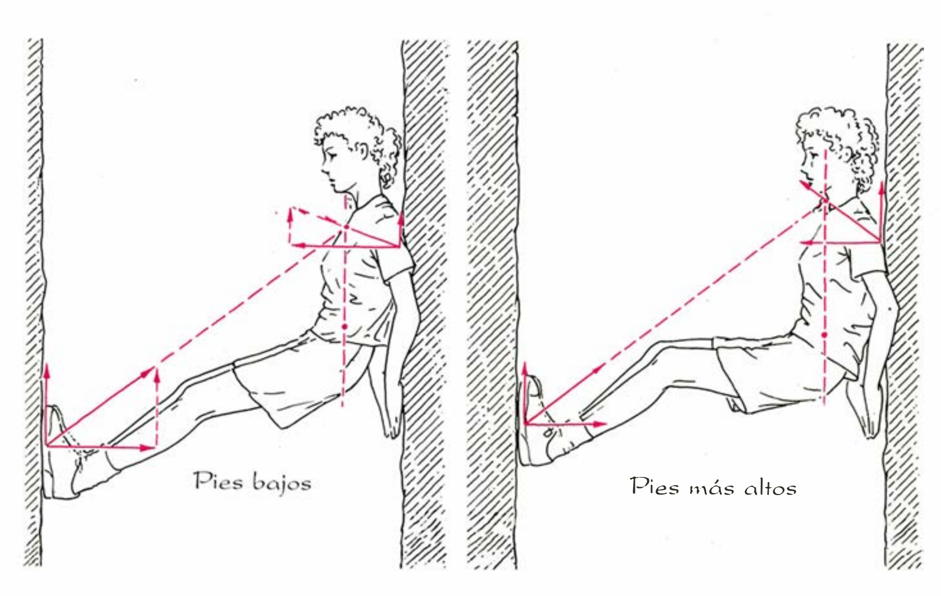
Pasemos ahora a la escalada de una chimenea [*véase la figura 7*], ejercicio que en mi juventud solía practicarse en distintas cuevas del oeste de Texas. En este caso, el equilibrio se establece al contrarrestar el peso del escalador con la suma de los rozamientos en sus hombros y pies, anulándose además mutuamente las fuerzas normales en los pies y en los hombros. (Esta vez hay sólo tres variables diferentes y es posible resolver las ecuaciones de equilibrio.) El gran esfuerzo que debe realizar el escalador se refleja en la magnitud de la fuerza normal, por lo que durante cada descanso el objetivo consiste en reducir esa fuerza tanto como sea posible sin comprometer la seguridad.

Afirman Hudson y Johnson que la fuerza normal puede reducirse al mínimo si los pies se colocan a cierta distancia por debajo de los hombros y si tanto los hombros como los pies están a punto de deslizar. Como el lector adivinará, esa distancia depende de los coeficientes de rozamiento en pies y hombros. Si disminuyera uno u otro coeficiente (por culpa de la humedad, por ejemplo), el escalador deberá disminuir la distancia vertical entre pies y hombros.



7. Fuerzas en la escalada de una chimenea

Para verificar esta conclusión de Hudson y Johnson ejecuté el ejercicio mental siguiente. Primero, ¿cuál es la dependencia del rozamiento en los pies respecto a la posición donde están colocados? Consideremos el peso del escalador y las fuerzas de reacción sobre sus pies y hombros [*véase la figura 8*]. También aquí es necesario que las prolongaciones de las fuerzas pasen por un punto de momento nulo si queremos mantener el equilibrio. Imagínese qué le ocurre a la fuerza de reacción en los pies si éstos se mueven y la fuerza normal no varía. Si los pies se desplazan hacia abajo, el rozamiento debe aumentar a fin de que la fuerza de reacción siga pasando por un punto de momento nulo. Si los pies se mueven hacia arriba, sucede lo contrario. Además, como la suma de las fuerzas debe equi-



8. Las fuerzas dependen de la colocación de los pies

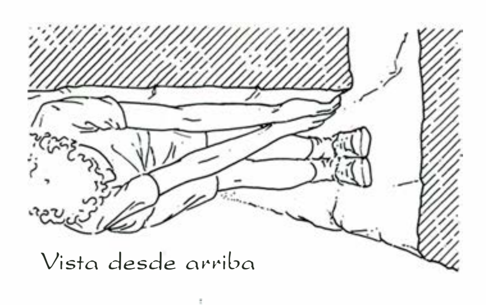
librar el peso del escalador, debemos compensar toda variación del rozamiento en los pies con un cambio de sentido contrario en el rozamiento de los hombros.

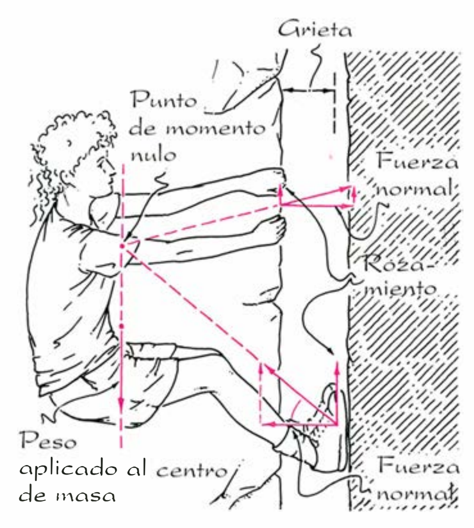
Supóngase que el escalador coloca los pies en algún punto bajo, y estable, de la chimenea; afloja el empuje contra la piedra hasta que los pies se encuentran a punto de resbalar. El ángulo de reacción alcanzará entonces su valor crítico. Si el escalador moviera los pies hacia abajo, aumentaría el rozamiento en los pies; para que el ángulo de reacción no rebase su valor crítico, habría que aumentar la fuerza normal. Así, pues, no es recomendable mover los pies hacia abajo.

¿Y moverlos hacia arriba? En tal caso disminuye el rozamiento en los pies y el ángulo de reacción puede mantenerse en su valor crítico a la vez que la fuerza normal disminuye sin peligro. El mover los pies hacia arriba permite al escalador relajarse un poco, pero la variación de las fuerzas en los hombros impide elevarlos demasiado. Conforme los pies suben y el escalador se va relajando, el rozamiento en los hombros se va acercando a su límite superior. La fuerza normal y el empuje ejercido por el escalador pueden minimizarse cuando el rozamiento en los hombros alcanza el límite superior. Si los pies se elevan más, la fuerza normal y el empuje deben aumentar.

Para ascender por una chimenea, el escalador debe impulsarse hacia arriba apoyándose en un pie; mas, para que ese pie no resbale con el impulso, se requiere mayor rozamiento en el pie y una fuerza normal adicional. Si no quiere correr peligro, el escalador debe preparar cada movimiento hacia arriba elevando primero un pie y apuntalándolo contra la pared. Si durante el ascenso ocurre que el pie inferior resbala, el pie superior brinda un apoyo que puede impedir una caída. Esta misma técnica puede reducir el riesgo del retranqueo: cuando el escalador deba apoyarse sobre un pie para elevar el cuerpo, el otro pie deberá colocarse en un punto más alto para hacer frente a la eventualidad de un resbalón del pie inferior.

El retranqueo, llamado también "bavaresa" en los círculos alpinistas, es fatigoso; la razón de ello hay que buscarla en la gran tensión a que se someten los brazos [*véase la figura 9*]. Si el escalador deseara descansar y minimizar aquella tensión, ¿tendrá que subir o bajar los pies? El lector podrá examinar el tema equilibrando fuerzas





9. Bavaresa en una grieta estrecha

e imponiendo la condición de que las fuerzas de reacción y el peso pasen por un punto de momento nulo.

En su procedimiento para determinar la posición óptima de los pies, Hudson y Johnson hicieron varias simplificaciones. Veamos algunas.

Introdujeron la hipótesis según la cual el rozamiento en las manos, muy pequeño, podía despreciarse y el rozamiento en los pies se hacía cargo del peso del escalador. Supusieron asimismo que la fuerza de reacción en las manos era horizontal. El punto de momento nulo se hallaba entonces en la intersección de la vertical que pasaba por el centro de masa y una recta horizontal que pasaba por las manos.

Dejo para el lector una postrera cuestión: si el escalador eleva los pies y éstos deben seguir proporcionando el mismo rozamiento, ¿qué debe ocurrirle a la fuerza normal para que la fuerza de reacción en los pies siga apuntando al mismo punto de momento nulo?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ELEMENTARY ROCK CLIMBING MECHANICS. R. R. Hudson y W. Johnson en *International Journal of Mechanical Engineering Education*, vol. 4, n.º 4, págs. 357-367; 1976.

Juegos de ordenador

Un popurrí de prosa y prosodia programadas

A. K. Dewdney

"Cuida del significado y los sonidos cuidarán de sí mismos."
–LEWIS CARROLL, *Alicia en el país de las maravillas*

Como hiciera notar el celebérrimo maestro oxoniense del absurdo, al escribir creativamente la semántica precede a la sintaxis. La buena literatura está conformada por el significado que en sí encierran las ideas del escritor. Los ordenadores todavía no son capaces de concebir ideas, y no pueden, por ende, tomar en cuenta el sentido de una composición. Mas los ordenadores sí pueden, desde luego, ocuparse de los sonidos, como varios programas recientes han demostrado. ¿Se trata, empero, de arte? Eso queda a juicio del lector.

Tomemos los escritos de MARK V. SHANEY, un programa de ordenador creado por Bruce Ellis (hoy en la Universidad de Sydney) que se basa en una idea de Don P. Mitchell, de los Laboratorios AT&T Bell. MARK V. SHANEY no es precisamente un programa que arranque por sí solo. Antes es preciso que el programa lea y medite sobre la obra de alguien. Produce entonces un comentario irregular, divagatorio y un tanto confuso sobre ella. A modo de ejemplo, citaré las reflexiones de MARK V. SHANEY tras la lectura de un texto elemental de química.

"Lava la pizarra. Obsérvala secarse. El agua va al aire. Cuando el agua va al aire se evapora. Ata un paño húmedo a un extremo de un sólido o un líquido. Mira alrededor. ¿Cuáles son las cosas sólidas? Cuales son las únicas que toman parte en las nubes mismas. Al moverse las nubes, el aire lanza las diminutas gotitas de agua. A veces, el agua que deja el cuerpo en las hojas de las plantas verdes. Es bastante poroso, casi como una esponja. Pero las paredes de los tubos huecos y de las células son muy fuertes. Al quemarse algo, acontecen cambios químicos..."

El comentario es apenas diferente tras haber digerido MARK V. SHANEY un libro de matemáticas elementales.

"Por qué contamos las cosas en grupos de cinco. Cuando la gente aprendió a contar muchas cosas, las asociaron con los dedos. Primero contaron suficientes cosas para ocupar los dedos de ambas manos. Después pusieron estas cosas en una botella de un litro. Una gigantesca botella de cuatro litros de capacidad es un número de tres cifras..."

A partir de aquí, la salida del programa se torna cada vez más confusa, como los lectores podrán comprobar por sí mismos en la figura 1.

Aunque los escritos de MARK V. SHANEY se distinguen por carecer de sentido, los sonidos, ciertamente, son correctos. La impresión general no es muy dispar de lo que retiene el cerebro de un estudiante poco atento tras una sesión de estudio hasta la madrugada. De hecho, después de leer la producción literaria de MARK V. SHANEY, ¡los escritos ordinarios me parecen casi igual de extraños e incomprensibles!

¿Cómo se las arregla MARK V. SHANEY para producir sus notables obras? La respuesta es bastante sencilla. El nombre del programa, un chiste malo basado en "Markov chain" (cadena de Markov) nos da ya una pista. En términos abstractos, una cadena de Markov es una sucesión de símbolos generados de acuerdo con una tabla de probabilidades. En la versión que hace al caso para el funcionamiento de MARK V. SHANEY, cada fila de la tabla se corresponde con un par de símbolos. Las entradas de cada fila consisten en símbolos individuales, emparejados cada uno con una probabilidad asociada. La generación de una secuencia de símbolos se produce merced a un algoritmo que comienza con una "cadena" de dos símbolos; a partir de ese punto recorre cíclicamente estos cuatro pasos sencillos.

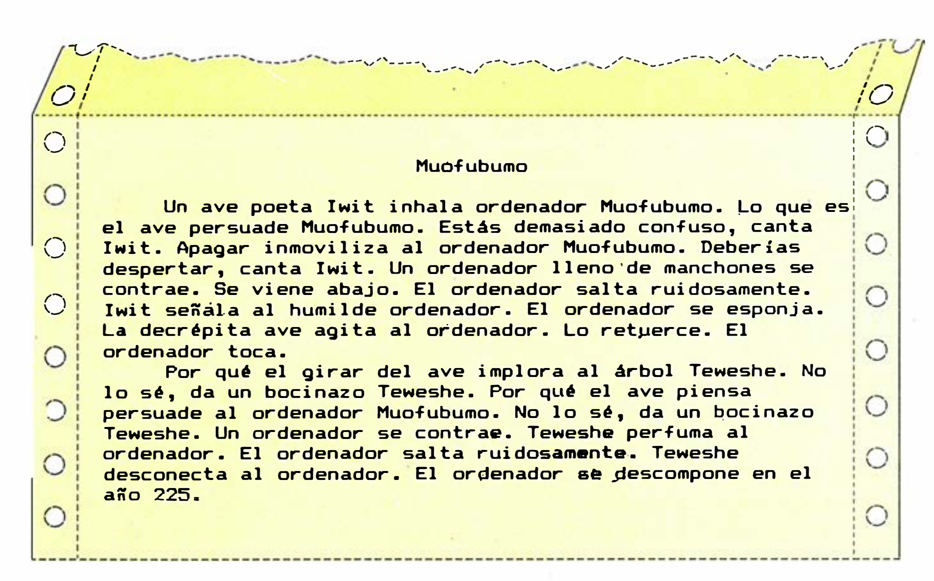
1. Hallar los dos últimos símbolos de la cadena actual.
2. Dirigirse a la fila de la tabla correspondiente al par de símbolos.
3. Seleccionar un símbolo en la fila, según su probabilidad.
4. Añadir el símbolo seleccionado al final de la cadena.

Por ejemplo, las primeras entradas de la tabla de una cadena de Markov correspondiente a los símbolos *A, B, C, D* podrían tener este aspecto:

AB: *B*(0,1) *C*(0,1) *D*(0,8)
AC: *A*(0,1) *B*(0,2) *C*(0,1) *D*(0,6)
AD: *B*(0,4) *D*(0,6)
BA: *B*(0,3) *C*(0,4) *D*(0,3)
BB: *A*(0,5) *C*(0,5)
.
.
.

```
    Por qué contamos las cosas en grupos de cinco. Cuando
la gente aprendió a contar muchas cosas, las asociaron con
los dedos. Primero contaron suficientes cosas para ocupár
los dedos de ambas manos. Después pusieron estas cosas en
una botella de un litro. Una gigantesca botella de cuatro
litros de capacidad es un número de tres cifras. Un dígito
toma su valor de la superficie de una acera son rectas, y
líneas rectas delimitan la pista de tenis y el diamante del
béisbol. Dibujando una línea recta sin la ayuda de una casa
o una mesa, ¿se elegiría una copia con preferencia a la
otra? Supongamos que haya "una posibilidad entre 52",`y
define la probabilidad, de acuerdo con esto, "¿de ser tan
alta?'', dijo ella. El ingeniero jefe sonrió. "Las ondas de
televisión no se curvan tanto como las de radio," dijo,
"pesqué 12 peces" ella supo inmediatamente que él tenía ese
número. Ella no 'tuvo que bajar a su barca para ver si tenía
ese número. Ella no tuvo que bajar a su barca a ver si había
cogido un montón o solo unos pocos...
```

1. Comentario matemático de MARK V. SHANEY



Muofubumo

Un ave poeta Iwit inhala ordenador Muofubumo. Lo que es el ave persuade Muofubumo. Estás demasiado confuso, canta Iwit. Apagar inmoviliza al ordenador Muofubumo. Deberías despertar, canta Iwit. Un ordenador lleno de manchones se contrae. Se viene abajo. El ordenador salta ruidosamente. Iwit señala al humilde ordenador. El ordenador se esponja. La decrépita ave agita al ordenador. Lo retuerce. El ordenador toca.

Por qué el girar del ave implora al árbol Teweshe. No lo sé, da un bocinazo Teweshe. Por qué el ave piensa persuade al ordenador Muofubumo. No lo sé, da un bocinazo Teweshe. Un ordenador se contrae. Teweshe perfuma al ordenador. El ordenador salta ruidosamente. Teweshe desconecta al ordenador. El ordenador se descompone en el año 225.

2. MELL*, de Firner, cuenta un relato*

Dando como cadena inicial el par de símbolos *AB*, el algoritmo tendría una probabilidad de un 10 por ciento de que el próximo símbolo seleccionado fuera *B*, un 10 por ciento de que fuera *C* y un 80 por ciento de que fuera *D*. ¿Cómo procede el algoritmo para seleccionar símbolos en función de sus probabilidades? Divide el intervalo numérico comprendido entre 0 y 1 en segmentos cuyas longitudes corresponden a las probabilidades de los símbolos. Selecciona entonces un número al azar entre 0 y 1 y determina a cuál de los segmentos pertenece el número.

Para la fila *AB* de la tabla anterior, los segmentos correspondientes a las probabilidades de *B*, *C* y *D* van desde 0 a 0,1, desde 0,1 a 0,2 y desde 0,2 a 1, respectivamente. Supongamos, entonces, que el generador de números aleatorios del ordenador entrega el valor 0,0172. Dado que ese número pertenece al primero de los segmentos, el próximo símbolo seleccionado en la cadena sería *B*. La ristra de símbolos sería ahora *ABB*. A continuación, el algoritmo consultaría la fila *BB* para seleccionar el cuarto símbolo de la cadena. Aquí, como antes, se genera un número aleatorio. Si éste es menor o igual que 0,5, se selecciona *A*; en caso contrario, el algoritmo selecciona *C*. A causa de su dependencia del azar, si se recomenzara el algoritmo con el mismo par inicial de símbolos, sería muy posible que produjese una cadena bien distinta.

Tal algoritmo fue utilizado en el decenio de 1940 por Claude E. Shannon, de los Laboratorios Bell, para determinar el contenido de información del lenguaje humano. Construyó las tablas de probabilidades del algoritmo inspeccionando texto ordinario y contando cuántas veces aparecía cada uno de los caracteres individuales tras cada par de caracteres (contados también los espacios en blanco). Una vez conocidas las frecuencias de los caracteres correspondientes a un texto dado, resultaba fácil transformarlas en probabilidades. Las cadenas de Markov de caracteres así generadas tenían propiedades estadísticas semejantes a las del texto fuente, pero rara vez contenían palabras válidas. ¿De qué forma aplica, pues, MARK V. SHANEY las cadenas de Markov para producir palabras inglesas comprensibles?

El truco consiste en aplicar el algoritmo de Shannon para cadenas de Markov, pero tomando como símbolos a concatenar palabras completas en lugar de caracteres individuales. Conforme MARK V. SHANEY va explorando el texto, construye una tabla de frecuencias correspondientes a todos los pares de palabras que constituyen el texto. El programa procede entonces a balbucear probabilísticamente, basándose en las frecuencias de las palabras.

Cualquier signo de puntuación adyacente a una palabra, y ésta es una peculiaridad clave del programa, se considera parte de la misma. Tal peculiaridad le permite formar frases dotadas de principio y fin. Aproximadamente la mitad de ellas obedecen, incluso, las reglas gramaticales. ¡Tiemblo al pensar en lo que el programa podría producir tras examinar este artículo!

Y la verdad es que otros se han estremecido ya ante las reflexiones de MARK V. SHANEY, unos de ira y otros de risa. Hace algunos años, Ellis decidió dejar su creación permanentemente conectada, "en línea". Las víctimas de los análisis de su programa fueron los inocentes usuarios de ordenador suscritos al tablón de anuncios de un boletín electrónico llamado *net.singles*. El tablón de anuncios proporciona a científicos, ingenieros, programadores y doctorandos de ambos sexos de todo el país un lugar donde dar a conocer sus pensamientos sobre temas tan diversos como el tipo de pareja con que a uno le gustaría salir, el maquillaje o las relaciones personales. ¿Por qué no dejar que MARK V. SHANEY lea los anuncios y responda con sus propios "pensamientos" sobre estos asuntos? He aquí algunas de las profundas reflexiones de MARK V. SHANEY.

"Cuando conozco a personas por razones profesionales, quiero que se afeiten las axilas. Mientras estaba en una conferencia, hace pocas semanas, pasé una interesante velada con un grano de sal. ¡No me atrevería a tomármelos en serio! Lo que me trae nuevamente a la gente descarada que desafía a otros a hacerlo así o no. Me encanta una buena discusión ardiente, probablemente más que nadie...

"Voy a introducir un tema nuevo: ¿tiene alguien alguna sugerencia? Cualquier otro tenga comentarios experiencia en o acerca de parejas interraciales, casadas o no, discriminación hacia delante o atrás, y sombra de ojos? Este es probablemente el origen del maquillaje, aunque vale la pena leerlo, no digamos juzgar a otra persona por leerlo o no. ¡Oh dioses!"

Las opiniones del nuevo corresponsal de *net.singles* provocaron división de opiniones. Los usuarios serios de los servicios del boletín percibieron la sátira. Enfurecidos, exigieron que alguien "desenchufase" a MARK V. SHANEY y sus monstruosos desvaríos. Otros se preguntaron casi admirativamente si el programa era un proyecto secreto de inteligencia artificial que se estaba ensayando en un ambiente coloquial humano. Unos cuantos llegaron incluso a pensar que MARK V. SHANEY era una persona auténtica, un esquizofrénico torturado, en busca desesperada de compañía con pareja mentalidad.

Si el propósito de la prosa generada por ordenador fuese engañar e inducir a la gente a pensar que ha sido escrita por una persona cuerda, es probable que MARK V. SHANEY se quedase corto. MELL, fruto intelectual de Bonnie V. Firner, de Piscataway, New Jersey, probablemente se aproxime un poquito más a esa meta. MELL escribe fantasmagóricas historias de ciencia ficción que poseen una peculiar y meditativa cualidad.

"El guerrero mira ceñudo en los impulsos de sequía. Se ama a sí mismo en la sequía. Se moldea a sí mismo en la sequía. Mira colérico al guerrero Dugaki en los pulsos de sequía. El la llama

en la sequía. El la gruñe en la sequía. El se sienta al costado de ella al costado de conciencia. El la agarra.

"Oh yo soy poderosa dice Oban. El la sofoca en la sequía. El la destroza de la turquesa...

"Oban mata a Dugaki. El lo tiene cogido con la turquesa. El mira en los impulsos de la sequía. El lo llama en la sequía. El lo gruñe en la sequía. El se sienta con él junto a codicia. El lo agarra. El lo sofoca en la sequía. El hace pedazos de la turquesa. El lo necesita bajo el rayo. Su cuerpo arde bajo el rayo..."

MELL consta de unas 1500 líneas de programa en BASIC; contrariamente a MARK V. SHANEY, el programa de Firner es complicado, incluso desde el punto de vista conceptual. El bucle principal del programa genera dos personajes expresados en función de 16 "descriptores" generados al azar, cuyos valores definen cualidades: tamaño, delicadeza, ocupación, edad y salud, olor, compromiso (desde indiferencia a fanatismo) e incluso poder mágico.

Tras haber elegido los nombres y rasgos de los personajes de la historia, el bucle principal procede después a determinar qué es lo que motiva a un personaje, lo que hace examinando los valores de sus diversos descriptores. Si uno de los descriptores de un personaje tiene valor bajo, MELL funda en tal hecho la interacción del personaje con los demás. Si ningún personaje tiene un valor de descriptor bajo, MELL decidirá sobre la naturaleza de la interacción de un personaje basándose en su ocupación. Para cada ciclo del bucle principal, el programa genera varias frases que describen los caracteres insertando nombres correspondientes a sus cualidades en "enchufes" gramaticales predeterminados. Entre las frases así generadas, se cuentan también las que Firner llama palabras "telón de fondo".

Por ejemplo, en la historia precedente, el telón de fondo "sequía" sitúa la escena. Consiguientemente, esa palabra se infiltra en muchas de las frases. Tras generar un párrafo que describe de este modo un acto realizado por uno de los personajes, recomienza el proceso de generación de frases. Entre una y otra iteración, el programa puede cambiar una cualidad de uno de los personajes, lo cual contribuye a evitar que la historia (si llega a haberla) se estanque.

¿Le será más fácil a un ordenador generar poesía que prosa? Uno lo duda, porque el significado contenido en la versificación tiende a ser mucho más denso que en la prosa. De los tres programas versificadores que voy a comentar, sólo está plenamente automatizado el llamado POETRY GENERATOR, escrito por Rosemary West, de Mission Hills, California; los otros dos requieren intervención humana para rematar el producto. He aquí la descripción que West da de su programa:

"Mi solución... consistió en suministrar al programa un gran vocabulario de palabras y frases que habrían de seleccionarse al azar y combinarse de acuerdo con un sistema de reglas gramaticales. Fijémonos, por ejemplo, en el ripio siguiente: "Hunde el árbol sus dedos cenceños/ en la charca helada y negra/ vítreo estanque que alegra/el juego de los pequeños."

"Podemos descomponer cada verso del poema en varias partes... 'Hunde' es un verbo; 'el árbol' es un sintagma nominal; 'sus dedos cenceños' es el objeto de tal verbo. Tras haber categorizado las partes de la oración, puedo encontrar entonces entre 100 y 400 sustituciones para cada parte, una de las cuales es arbitrariamente seleccionada por el ordenador. Por ejemplo, con la misma estructura se podría obtener: 'Oculta una mujer seis gatos grises/ bajo un auto cochambroso y viejo / mientras entran a coro en tu dolor añejo/ museo de cera, los payasos tristes.'"

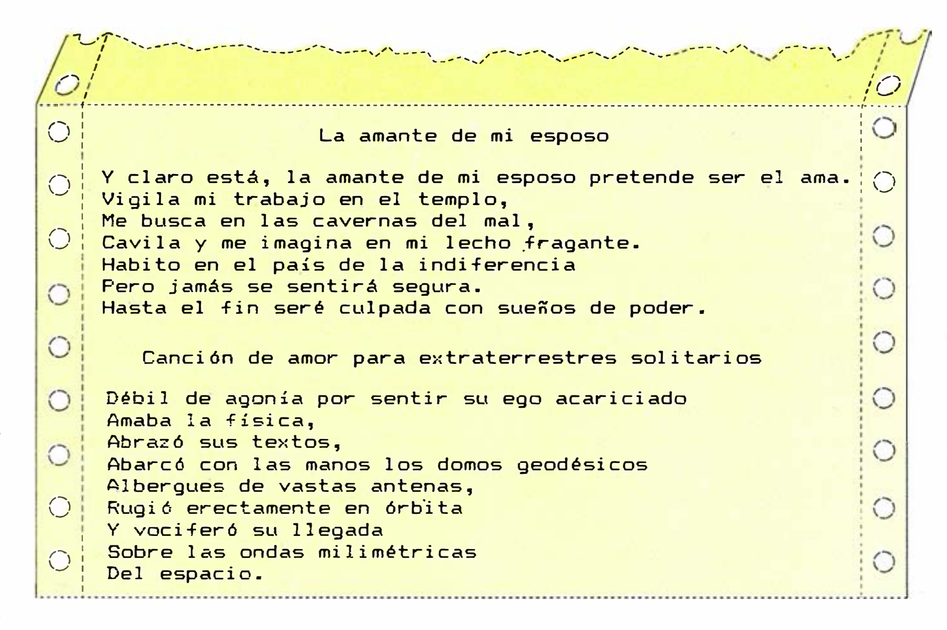
Las estructuras poéticas en las que POETRY GENERATOR engarza sus palabras pueden variar considerablemente, prestando así variedad a la sintaxis y al aparente significado del poema. West ha basado en parte la salida del POETRY GENERATOR en las estructuras de sus propios poemas, algunos de los cuales se han publicado.

Thomas A. Easton, de Belfast, opina que la mejor forma de generar poesía con ordenador comporta, por necesidad, una simbiosis entre humano y máquina. Easton ha escrito un programa semiautomático bautizado THUNDER THOUGHT que proporciona temas para poemas. Igual que antes, citaré al autor del programa:

"La mente creativa, tal cual yo la concibo, consta de dos componentes: la mente espontánea y la mente crítica. La primera genera combinaciones aleatorias de cualesquiera palabras, ideas e imágenes que casualmente se encuentren en una especie de foco mental (juntamente con material periférico, lo que explica por qué la mente espontánea puede sorprendernos). La mente crítica procede entonces a desechar como desperdicios la mayor parte de cuanto la mente espontánea ha producido, elaborando, corrigiendo y contorsionando el resto, al objeto de construir poemas."

Basándose en listas internas de nombres, verbos, adjetivos y adverbios, THUNDER THOUGHT opera más o menos como el POETRY GENERATOR de West. Inserta palabras en una especie de soporte y produce lo que Easton considera material poético en rama, que la mente humana ha de refinar.

"El resultado intermedio es una suerte de basura ridícula, absurda, contraria a la gramática... pero no siempre. Entre las muchas líneas de basura se ocultan siempre unas cuantas líneas ante las que uno responde. Tienen sentido... o parecen tenerlo. Nos suplican que dediquemos un momento a declamarlas. No faltan una o dos que están como empeñadas en que les construyamos una tercera. Le estimulan a uno a pensar en otros versos que puedan hacerles compañía. Unas cuantas co-

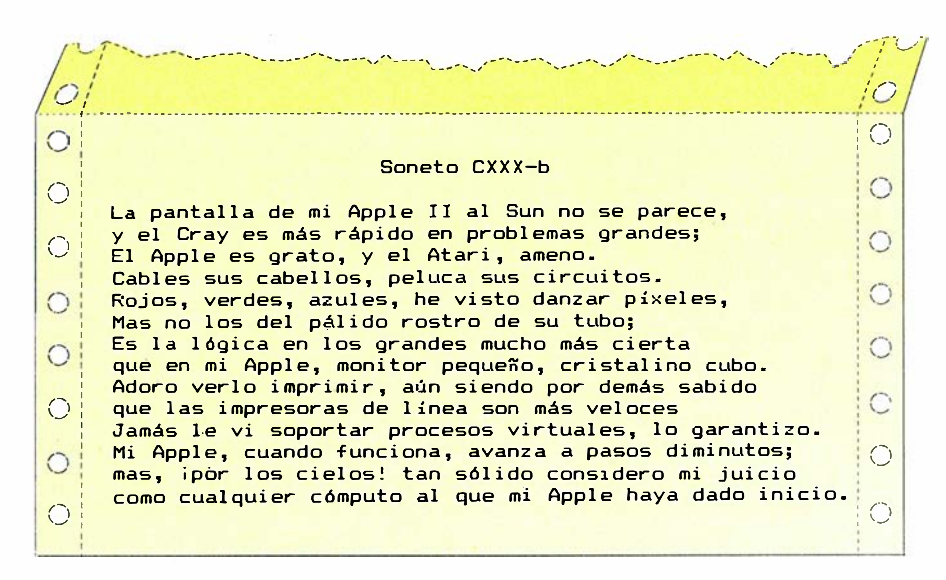

La amante de mi esposo

Y claro está, la amante de mi esposo pretende ser el ama.
Vigila mi trabajo en el templo,
Me busca en las cavernas del mal,
Cavila y me imagina en mi lecho fragante.
Habito en el país de la indiferencia
Pero jamás se sentirá segura.
Hasta el fin seré culpada con sueños de poder.

Canción de amor para extraterrestres solitarios

Débil de agonía por sentir su ego acariciado
Amaba la física,
Abrazó sus textos,
Abarcó con las manos los domos geodésicos
Albergues de vastas antenas,
Rugió erectamente en órbita
Y vociferó su llegada
Sobre las ondas milimétricas
Del espacio.

3. *POETRY GENERATOR* (arriba) *y THUNDER THOUGHT* (abajo) *desafían a los literatos*



4. Un autor desconocido y ORPHEUS *conjugan sus talentos en un soneto*

rrecciones acá y allá, un poco de interpolación, de elaboración y *–voilà!–* un poema."

Easton ha escrito por este método unos 110 poemas, de los que ha publicado 32; algunos han aparecido incluso en revistas literarias. Tal proporción, se ufana, pondría verdes de envidia a no pocos poetas auténticos.

La última palabra sobre poesía por ordenador la dedicaremos a ORPHEUS, un programa concebido por Michael Newman, poeta neoyorkino. ORPHEUS define unas referencias estrictas, que van desde las estrofas haiku hasta los sonetos, en las cuales los poetas humanos pueden ir insertando las palabras que elijan. ORPHEUS es fundamentalmente un procesador de palabras ("procesador de poesía", en la terminología de Newman) que establece los versos de una forma poética determinada. El programa permite a un humano ir rellenando los versos a su antojo y acabarlos después con la ayuda de un diccionario de rimas. Disponiendo a ORPHEUS en modalidad "soneto", uno podría escribir un par de versos (a imitación del *Soneto a Violante*), como sigue:

La pantalla de mi Apple algo sí brilla;
no tanto como el Sun; es más barato.

Dado que el primer verso acaba en la palabra "brilla", ORPHEUS consulta su diccionario de rimas y exhibe cierto número de consonantes con "brilla": anilla, maravilla, sombrilla, y así sucesivamente. Al examinarlas, nuestro ojo podría posarse en "maravilla". ¿Y no fue el Apple la primera maravilla?

La asociación de amenidad y juegos nos hace pensar en el Atari para el siguiente verso,

El Atari, en juegos ameno y grato

El primer cuarteto se liquida buscando una palabra que rime con brilla,

Cables hoy, mañana óptica fibrilla...

Es posible que haya lectores interesados en la que seguramente sea la *opera magna* de MARK V. SHANEY: un comentario de 20 páginas sobre la filosofía desconstruccionista de Jean Baudrillard. Tal proeza fue dirigida por Rob Pike, de los Laboratorios AT&T Bell, con ayuda de Henry S. Baird y Catherine Richards. El comentario puede obtenerse escribiendo a Pike AT&T Bell Laboratories, 600 Mountain Avenue, Murray Hill, N. J. 07974.

En la creciente comunidad de devotos del conjunto de Mandelbrot están ingresando estudiantes italianos, agentes de bolsa singapureños y médicos estadounidenses. Y todo gracias a un viaje en el Mandelbús, que describí en el artículo del pasado mes de abril. El esfuerzo por hacer más comprensible el algoritmo básico de iteración hizo aumentar el número de viajeros y tal vez el de lectores. Empero, como hacen ver algunas cartas, subsiste aún cierto grado de confusión. La única parada del Mandelbús cuya pertenencia al conjunto es objeto de verificación es la primera. Las paradas subsiguientes pueden hallarse o no en el conjunto; pero si una cualquiera de ellas resulta encontrarse a más de dos unidades del origen, la primera parada puede quedar automáticamente excluida del conjunto de Mandelbrot.

Los lectores que intentaron visitar la zona del conjunto de Mandelbrot que Andrew LaMance denomina "canal del amor" quedaron decepcionados, pues solamente encontraron un baldío. Y es que les dieron mal las coordenadas de la dirección. Un signo menos frente a la primera de ellas hubiera puesto a los lectores en el centro de esta zona contaminada, tan curiosamente incitante y atractiva.

Tal vez me haya dejado impresionar en exceso por la amplificación de 54.000 que logró Ken Philip, de Fairbanks, Alaska, al generar la imagen del cetro de un caballito de mar. Mal puede decirse que tal amplificación señale el límite de resolución de un ordenador. De hecho, las amplificaciones de ese orden son asunto casi rutinario para A. G. Davis Philip, de Schenectady, N.Y., y para su hermano Ken. El Philip de Schenectady escribe: "En noviembre, estando en Fairbanks con mi hermano, su Mac II produjo una imagen de un [Mandelbrot] enano a una amplificación de 2×10^{31}. Me parece que es cosa digna de mención".

Peter Garrison, de Los Angeles, coincide al afirmar que la modalidad de doble precisión de que disponen la mayoría de los ordenadores personales (en la cual, el número de bits que componen una "palabra" se duplica) permite, en realidad, mucho más que duplicar la potencia y resolución del ordenador. En efecto, la potencia se duplica por cada incremento efectivo de un bit en la longitud de la palabra. En consecuencia, pueden lograrse amplificaciones extraordinariamente grandes merced a la precisión proporcionada por procesadores y programas especiales.

Casi al final del artículo, mencioné un algoritmo nuevo y rápido para el cómputo del conjunto de Mandelbrot, descrito por Uval Fisher en el libro *The Science of Fractal Images*. William S. Cleveland, de los Laboratorios AT&T Bell, escribió para explicar que, en realidad, el algoritmo fue desarrollado por William P. Thurston y Allan R. Wilks. Según Cleveland, el nuevo algoritmo no sólo es más rápido, sino que también es capaz de producir imágenes más precisas del conjunto que el algoritmo corriente. Como dice Cleveland: "Si subimos al bus y es el algoritmo Thurston-Wilks el encargado de pintar el panorama (en blanco y negro), un mundo enteramente nuevo y más realista se abrirá ante nosotros".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

JUEGOS DE ORDENADOR. Brian Hayes en *Investigación y Ciencia*, n.º 88, págs. 102-108; enero de 1984.

Libros

Ciencia y poder, SIDA, neutrinos y Maupertuis

Laureano Carbonell, Amador Schüller, Cayetano López y Luis Alonso

POWER AND PENURY. GOVERNMENT, TECHNOLOGY AND SCIENCE IN PHILIP II'S SPAIN, por David C. Goodman. Cambridge University Press; Cambridge, 1988.

La mayoría de obras dedicadas a la ciencia y técnica europeas de la edad moderna, publicadas en el extranjero, suelen omitir las aportaciones españolas, por suponerlas de escasa incidencia en el progreso científico. La realidad es muy otra, según han demostrado algunos eruditos españoles a lo largo de los años y a los cuales debemos unir ahora a David C. Goodman, profesor de historia de la ciencia y de la técnica de la Universidad a Distancia inglesa. Como resultado de tres viajes de estudio e investigación en los principales archivos de nuestro país, Goodman ha obtenido los datos suficientes para demostrar que aquella opinión estaba no solamente muy alejada de la realidad, sino también que el propio Felipe II se interesó por diversos campos tecnológicos, a los que prestó un decidido apoyo. Goodman estudia cinco de tales campos, en otros tantos capítulos de la publicación que estamos comentando.

El primer capítulo de la obra está dedicado a las ciencias ocultas, supersticiones y predicciones por las que buena parte de la población española de la época mostraba gran credulidad. En este particular, los autores que han trabajado el tema no se ponen demasiado de acuerdo sobre la aceptación o no por Felipe II de tales prácticas. Goodman, sin embargo, adopta una posición intermedia y atribuye al rey una curiosidad e interés bastante limitados. De todos modos, destaca el hecho de haber ordenado el pago de los servicios de dos zahoríes, contratados para encontrar agua con que abastecer El Escorial y los palacios de El Pardo y Real, de Madrid. Lo que por otro lado, no encaja demasiado bien con la firme inclinación de Felipe II por reunir una buena biblioteca en El Escorial, entre otras medidas.

Según Goodman, una de las ciencias que recibieron mayor atención por parte del rey fue la cosmografía, debido a las necesidades del trazado de mapas y al impulso de la propia corona que auspició el proyecto de redactar sendas geografías de España y de Nueva España.

Aunque algunos historiadores atribuyen a Felipe II cierto "despego o antipatía por la mar", según palabras del propio C. Fernández Duro en "Armada Española", v. III, pág. 173, el monarca se preocupó por el perfeccionamiento de la navegación, pese a la encomiable labor desarrollada al respecto por la Universidad de Mareantes y Casa de Contratación de Sevilla, lo que se concretó, en 1575, en la búsqueda de un "profesor de pilotage y navegación" que, con carácter itinerante, enseñara tales materias en la costa del Cantábrico, en cursos de cuatro meses de duración. También en la Academia de Matemáticas, establecida en Madrid en 1582, se impartieron clases de navegación, manejo de instrumentos náuticos y trazado de cartas de navegar.

El rey procuró impulsar también la construcción naval, tanto de galeras, en las atarazanas de Barcelona, como de naves grandes y apropiadas para el comercio de Indias, en detrimento de las de reducido porte que propugnaban los comerciantes del norte, y cuyas primeras unidades salieron de Guarnizo en 1583. Estas medidas, debido a la necesidad de dotarlas de artillería, pusieron en evidencia la dificultad de obtener cañones, a causa de la insuficiente producción de las fundiciones de Málaga y Lisboa, como consecuencia de la falta de mano de obra especializada, del mismo modo que escaseaban también los artilleros e ingenieros militares especialistas en obras de fortificación. Para remediar en algo esta situación y a instancias del rey, la Casa de Contratación había creado ya una escuela de artillería en Sevilla en 1575.

No podían faltar durante el reinado de Felipe II los ofrecimientos a la corona de inventos bélicos, como ametralladoras, defensas contra el ataque de la caballería, ruedas para permitir el paso de galeones por zonas de poco calado, cadenas flotantes destinadas a impedir el ataque de los brulotes o incluso un nuevo método de carenaje, puesto en servicio en Sevilla en 1560. También se hicieron experiencias para proteger del teredo la madera del casco de los buques y se fomentó la idea de encontrar algún sistema capaz de proporcionar agua potable a los ejércitos de tierra y mar, así como también de desalinizar el agua del océano.

Otro aspecto a destacar es el auge y progreso experimentado por la minería de plata en época de Felipe II, cuyas primeras manifestaciones tuvieron lugar a partir de la recién descubierta mina de Guadalcanal (1555), pese a las dificultades de alojamiento de los obreros y a las reclamaciones del propietario de las tierras y de los descubridores del filón. Como consecuencia de todo ello se llegó a la promulgación de una extensa legislación sobre la minería de metales preciosos (1559, 1563 y 1584), que estaría en vigor durante dos siglos.

En la minería de la plata se introdujo el método de amalgamación, mejorado en 1586 con la mezcla de algo de escoria de hierro, que producía un gran ahorro tanto de mercurio como de combustible, al mismo tiempo que el proceso ganaba en rapidez. Lamentablemente, la mezcla de dicha escoria fue prohibida en 1588 y 1590 por reducir los beneficios que el mercurio proporcionaba a la corona.

El autor dedica el último capítulo a destacar el interés del monarca por la asistencia sanitaria, incluyendo el establecimiento de hospitales para pobres, cuyas primeras obras inició Isabel la Católica y se difundieron por América en época de Carlos I. Felipe II, por su parte, propició el establecimiento de nuevos hospitales, con el soporte de la

Iglesia o de instituciones caritativas, como el de Nuestra Señora de la Consolación, de Acapulco (1580), destinado a obreros y esclavos.

De igual forma, la corona se preocupó por el progreso de la ciencia médica, autorizando la cesión de cuerpos de criminales para efectuar estudios de anatomía en la facultad de Alcalá (1539) y creando la figura de los llamados protomédicos, entre cuyas funciones figuraban las de examinar y autorizar la práctica de la medicina. Paralelamente es de destacar el interés de Felipe II por la obtención de nuevas plantas medicinales, que se puso de manifiesto con el envío de una expedición a Indias (1570), al frente de la cual estaba su propio médico, y que constituyó el mayor éxito científico de su reinado. No olvidó tampoco el rey los servicios médicos para militares, las medidas encaminadas a cortar las epidemias, ni la creación de hospitales temporales, como el de Lisboa (1587) destinado a la armada. Existió incluso el proyecto de llevar un hospital portátil en ocasión de la expedición a Trípoli.

Como colofón a la obra figuran las conclusiones del autor sobre los resultados de la política científica y tecnológica de Felipe II. En su opinión, para llevar a cabo dicha política, la corona tuvo que apoyarse en la entrada de técnicos y científicos extranjeros en el país, con la convicción de que transmitirían los conocimientos y experiencia a sus súbditos. Sin embargo, esta transmisión no se produjo y en el siglo XVII España seguía dependiendo de técnicos extranjeros. Las razones que lo justifican fueron, según el autor, las frecuentes crisis económicas y la excesiva preocupación por la pureza de la sangre, entre otros factores.

En resumen, se trata de una obra muy amena, de fácil lectura y muy bien documentada que constituye una notable aportación al conocimiento y divulgación de algunos aspectos de la historia de la ciencia y técnica españolas realmente interesantes. (L. C.)

EL SIDA, por W. A. Haseltine *et alii*, con introducción general de Robert C. Gallo y Luc Montagnier. Prensa Científica, S.A. Barcelona, 1989.

Al grupo de enfermedades pestilenciales, epidémicas y hasta pandémicas que en antiguas centurias asolaban poblaciones, peste, cólera y fiebre amarilla, se añadieron, posteriormente, malaria, viruela, rickettsiosis, poliomielitis, tuberculosis, muchas de ellas vencidas por métodos preventivos, vacunas y terapia quimio-antibiótica. Se superan así las enfermedades infecciosas y dejan el primer lugar de morbimortalidad a la cardiopatía isquémica, al cáncer y a los accidentes de tráfico. En esta situación, emerge en el cuarto final del siglo XX, como verdadero azote epidémico, la infección por retrovirus HIV (virus de la inmunodeficiencia humana), con focos en todos los continentes y seguida de la aparición de casos del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA), en peligroso incremento y de evolución fatal, constituyéndose en el fundamental problema sanitario a escala mundial.

Múltiples aportaciones científicas de los grupos de investigadores, en un trabajo intenso e incesante, se concretan en cientos de publicaciones clave para el conocimiento del SIDA. La monografía que sobre éste realiza INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agrupando trabajos y conclusiones de reputados equipos de científicos, es una contribución de alta calidad, excelente, para todos los interesados en el tema. Pero esta monografía no sólo cumple las exigencias de un libro de divulgación científica. En sus capítulos profundiza en el análisis de los diferentes aspectos que la enfermedad plantea (etiológicos, patogénicos, inmunológicos, epidemiológicos, clínicos, socioeconómicos).

La *Introducción*, firmada por Robert C. Gallo y Luc Montagnier, investigadores que descubrieron y mejor estudiaron el retrovirus causal, es una clara panorámica del transcurso de los acontecimientos hasta llegar a su hallazgo y confirmación. Se identifican, a continuación, como el mismo virus el descrito por Gallo como HTLV-III (quien había previamente descubierto los retrovirus HTLV-I y II) y el retrovirus LAV (virus asociado a linfoadenopatía) de Luc Montagnier, y se habla de retrovirus HTLV-III/LAV; posteriormente, una comisión especial designa con el nombre de HIV (virus de la inmunodeficiencia humana), y luego HIV-I, al descubrirse otros retrovirus similares y también con patogenidad humana, como el hallado por Essex y Kanki en 1985, en prostitutas de Africa occidental (Senegal), parecido al SIV (virus de la inmunodeficiencia del simio), intermedio entre el HIV y el SIV, que produce un cuadro clínico menos grave que el SIDA por HIV-I, y denominado, en principio, HTLV-IV y, actualmente, HIV-2. El virus aislado en Guinea por el grupo de Montagnier se identifica con el HIV-2 antedicho.

Hay que resaltar la complejidad genética de los retrovirus HIV. Afectan preferentemente a los linfocitos T-4 y a otras células, como monocitos y macrófagos. Poseen una especial enzima, la transcriptasa inversa, imprescindible para la replicación, capaz de invertir la secuencia normal ADN-ARN en ARN-ADN en el genoma celular. El virus HIV-I se inserta en cualquier lugar del genoma celular y puede inducir la proliferación maligna (cáncer o leucemia).

El virus HIV actúa en una región llamada X (Gallo, Seiki y Yoshida), implicada en la síntesis de cuatro proteínas y situada cerca del LTR ("long terminal repeat"). El gen inductor de una de las antedichas proteínas se llama gen tat, común a todos los retrovirus y capaz de inducir la interleucina 2 (IL-2). Una vez efectuada la inducción, se produce el crecimiento celular, de tipo maligno si concurre algún otro factor. El retrovirus HIV implantado en células linfoides T ocasiona un déficit funcional de éstas, guarda relación con la leucemia de células B y provoca el cáncer de células T (relación de gran interés entre retrovirus y carcinogénesis).

El retrovirus HIV puede invadir las células T y permanecer en ellas en estado latente, hasta que una nueva infección u otra causa lo active. Se origina entonces la replicación vírica, que mata células T con gran vulnerabilidad para las infecciones oportunistas.

La acción del retrovirus HIV se inicia por la fusión virus-célula T. Ello corre a cargo de las glicoproteínas de la superficie del virus, denominadas gp 120 y gp 41; penetra en la célula el ARN vírico que, por la transcriptasa inversa, se convertirá en ADN. La replicación de los retrovirus se encuentra controlada, como muy bien describe Gallo, por genes reguladores: gen env (controla la proteína de la cubierta), gen gag (controla las proteínas nucleares), gen pol (controla la transcriptasa inversa), gen tat (controla la transcripción del ARN mensajero), gen trs (controla el equilibrio entre las múltiples formas de ARN vírico) y genes sas y 3'orf, de función aún por establecer. Los factores de activación promueven la replicación vírica, de la que resultan múltiples partículas que salen de la célula, con la presumible muerte de ésta (déficit de células T con inmunodeficiencia).

Consideramos fundamental el hallazgo de Gallo sobre la capacidad de los HIV para invadir monocitos y macrófagos, células que podrían transportar el

virus, a través de la barrera hematoencefálica, hasta el sistema nervioso; allí da lugar a alteraciones de la materia gris y blanca y desmielinizaciones graves. Expone Gallo el mecanismo de producción de los tres tipos de neoplasias que aparecen en los sidosos: el sarcoma de Kaposi (más frecuente entre los homosexuales), el carcinoma de piel y de mucosas y el linfoma de células B.

Analizan Haseltine, del Instituto Oncológico Dana-Faber, y Wong-Staal, del Instituto Nacional del Cáncer, la biología molecular del HIV. La relacionan con la historia natural de la enfermedad y completan la exposición de los genes estructurales, que aislaron, y los genes reguladores de los retrovirus humanos, especialmente del gen tat, responsable de la replicación vírica. El gen rev está implicado en la diferenciación y, por ello, en la conversión de una infección inactiva en activa; el gen nef parece ser un regulador negativo responsable, quizá, del paso del virus a una situación intracelular latente. Por otra parte, el ciclo vital del virus de la inmunodeficiencia humana viene condicionado por la célula del huésped. El estímulo, por ejemplo, antigénico de la célula T pone en movimiento la replicación vírica bajo la dirección del gen tat. Ciertas proteínas celulares interaccionan con áreas del genoma vírico donde tiene su inicio la síntesis del ARN. En suma, una constelación de factores celulares estimulan la replicación vírica; otros la inhiben. Una vez producida la partícula, el gen vif transporta la capacidad agresiva y virulenta de infectar otras células; se inicia mediante la fusión de la proteína gp 120 de la cápside con el receptor CD4 del linfocito T.

Max Esses y Phyllis J. Kanki, de la Escuela de Salud Pública de Harvard, se ocupan del origen de los retrovirus. Analizan las diferencias entre los HIV-1 y HIV-2 con el retrovirus del simio SIV, amén de su patogeneidad para el hombre y simios. Llegan casi a la certeza de que la infección por HIV partió de Africa central, difundiéndose desde allí al resto del mundo. Confirmado el HIV-2, la infección producida por éste es menos grave que la del HIV-1, también de transmisión sexual, como lo prueba el que sea cinco veces más frecuente su hallazgo entre prostitutas en Africa, y produce un síndrome donde suelen estar ausentes las linfoadenopatías. Estas diferencias tienen base molecular. El virus HIV-1 y HIV-2 poseen proteínas distintas. El gen vpn está ausente en el HIV-2 y en el SIV; sí poseen el gen vpx, ausente en HIV-1.

Quizás uno de los capítulos de mayor enjundia conceptual para entender el síndrome del SIDA es aquel en el que Jeffry Lawrence, de la Universidad de Cornell, aporta un claro y sencillo resumen de la respuesta inmune frente a los retrovirus. Sitúa al lector en condiciones idóneas para comprender la secuencia de los fenómenos inmunitarios: el macrófago presenta en su superficie los antígenos junto a los de histocompatibilidad mayor, o tipo II, a las células linfocíticas T-4; segregan interleucinas 1, activadores de linfocitos T-4, que, a su vez, producen linfocinas, interleucina 2, con capacidad de estímulo proliferativo de los propios linfocitos T, y estimulan después a las células linfoides B. ¿Cómo puede el retrovirus HIV escapar al seguro mecanismo planificado por el sistema inmune? En parte, por las mutaciones que experimenta, que le permiten soslayar los mecanismos de defensa. Por otro lado, el HIV ataca al sistema inmunitario colocándolo en un bajo nivel defensivo; por su acción pueden sucumbir gran número de células T o resultar incapacitadas funcionalmente y permanecer, en algunas de ellas, el HIV en situación de vida latente. Al resentirse, secundariamente, la estirpe B de células linfoides, aparecen infecciones oportunistas que influyen en la evolución del síndrome del SIDA.

No podían faltar amplios y documentados capítulos relacionados con los aspectos inmunológicos. Corren a cargo, en cuanto al ámbito internacional, de Mann, Piot, Chin y Quinn, de Heyward y Curran en USA, y de Rafael Nájera, director del Instituto de Salud Carlos III, lo relacionado con España. Todos los investigadores coinciden en los grupos de riesgo, eso sí, con porcentajes variables: drogadictos venosos, homosexuales y transfundidos con sangre o con derivados de ésta, heterosexuales en contacto con drogadictos venosos. Nájera señala el predominio del SIDA en las comunidades de Madrid, Barcelona, Baleares y País Vasco. Es mayor el número entre la población drogadicta y la incubación varía de meses a años. Sugiere Nájera que el inicio del SIDA-enfermedad podría relacionarse con algún antígeno, o con la disminución de algún anticuerpo.

Se detallan las características del contagio. La transmisión perinatal puede alcanzar, si la madre está infectada, una frecuencia entre el 30 % y el 50 %. Capital interés ofrece la posibilidad de contagio, por sangre contaminada, del personal sanitario —riesgo profesional— a través de pequeñas heridas en la piel o las mucosas.

Es difícil predecir la dimensión final de la epidemia. En lo referente a la mortalidad, se cifra ésta en un 50 % el primer año y medio, después del diagnóstico, el 80 % a los tres años y posiblemente el 100 % a los 5 o 6 años. Difieren los porcentajes de cada grupo de riesgo en los diferentes países afectados; en este sentido se han reunido en tres grandes grupos o pautas. En la pauta I: América del norte, centro y sur, Europa occidental, Australia y Nueva Zelanda (90 % entre drogadictos y homosexuales, predominio del varón e infrecuente infección perinatal). En la pauta II: Africa occidental, meridional, central y oriental y países del Caribe, mayoría en heterosexuales y muy frecuente infección perinatal. En la pauta III: Europa del este, norte de Africa, Oriente medio, Asia y área del Pacífico. No se ha observado una mayor susceptibilidad de base genética para la infección entre grupos étnicos, si bien están más predispuestos los afectados por enfermedades o situaciones con inmunodepresión.

En los últimos cuatro capítulos se hace un preciso y completo resumen de la clínica del SIDA y deterioro progresivo de la función inmune ocasionada por los retrovirus HIV con repercusión multisistémica. Redhf y Burke resaltan la importancia del diagnóstico precoz, que permitirá impedir las nuevas infecciones inadvertidas y posibilitar mejores resultados del tratamiento precoz con AZT. Con dicho fin, preconizan la clasificación del paciente en estadios; el 0 sería el normal; en el estadio 1, se descubriría el virus o los anticuerpos; en el 2, la presencia de adenopatías e hipergammaglobulinemia; en el estadio 3, la disminución de células T-4 por debajo de 400; en el 4, deterioro de la inmunidad celular; en el 5, anergia, desarrollo de muguet, infecciones dérmicas de la piel y de mucosas (virus herpes, candidasis), y, en el estadio 6, hallaríamos infecciones oportunistas, síndrome del SIDA, sarcoma de Kaposi y linfomas.

Basta la enumeración de las infecciones oportunistas para evidenciar la gravedad de esta mortífera infección: neumonías por pneumo-cystis carini, toxoplasmosis, criptoporidiosis con afectación intestinal y diarrea crónica, candidiasis localizada y generalizada, criptococcosis, tuberculosis, citomegaloviriasis, salmonelosis, histoplasmosis,

legionelosis y un largo etcétera, además de los linfomas, sarcoma de Kaposi y de la demencia progresiva por afectación cerebral.

Partiendo del hecho patogénico capital de la enfermedad, a saber, el tropismo de la gp120 de la partícula vírica por el receptor CD4 de los linfocitos T-4, Weber y Weiss, de la Universidad de Londres, consideran abiertos dos caminos terapéuticos: actuación sobre la proteína gp120 del virus para que no se pueda unir al receptor CD4 o bien bloquear éste.

Le cabe a los dos últimos investigadores el mérito de demostrar que, manejando anticuerpos monoclonales frente al antígeno CD4, cabe bloquear la unión del virus con la célula T e impedir la formación de sincicios multinucleados, inequívoca señal de infección HIV y en cuya producción desempeña fundamental papel la proteína gp41. Observado que también las células linfoides B y las macrofágicas poseen CD4, se han conocido las zonas del CD4 donde se consuma la fusión. Acontece sobre siete aminoácidos centrales del CD4 (Peterson y Brian) y en tres regiones de la gp120 (Haseltine y Sasky). Estos trabajos han propiciado la puesta en marcha de anticuerpos monoclonales que actúan sobre la antedicha área de unión, pero al parecer neutralizan el virus sólo de forma ligera (así actúa el 0,5 B, obtenido por Matshashita).

El conocimiento de la biología molecular ha permitido diseñar estrategias farmacológicas e inmunoterapéuticas. No existe suficiente experiencia con los compuestos sulfatados de cadena larga, inhibidores de la replicación HIV, como el sulfato de dextrano. Alguna se tiene con los análogos de los nucleósidos, especialmente con el 3-azido-2' 3'-didesoxitimidina o AZT; transformado en el organismo en trifosfato, su forma activa se engarza con la transcriptasa inversa o se incorpora en las cadenas de ADN, sustituyendo al trifosfato de timidina normal. Otro análogo es el dda, es decir, el 2'3' didesoxiadenosina, cuyo trifosfato constituye un potente inhibidor del HIV. Yarchoam refiere la experiencia con AZT en 12 hospitales de los Estados Unidos. Se evidenció una prolongada supervivencia de un año en comparación con otros que en la misma fase o estadio eran tratados con placebo.

Otra perspectiva terapéutica es la obtención de una vacuna eficaz. Se consiguió ya frente a la poliomielitis, viruela, rubéola, etcétera. La dificultad reside ahora en las peculiaridades del retrovirus HIV, capaz de mutar, de cambiar la secuencia de aminoácidos de la proteína gp120 y de permanecer oculto en compartimientos celulares, sin nada que lo delate en su superficie (Matthews y Bolognesi). Las primeras vacunas ensayadas se lograron a partir de una subunidad de gp120 combinada con alumbre o bien con un virus vacunal que induce una fuerte reacción inmunógena. Otro intento se ha realizado con la proteína p-17 (Goldstein), así como las vacunas antiidiotipo (Dalgleish y R. C. Kennedy).

Hay que esperar que el virus no sea invulnerable a futuros fármacos o se prevenga la infección mediante vacunas. Mientras tanto, debemos insistir en los tres grandes objetivos: evitar nuevos casos de infección por HIV, mejorar la asistencia y la atención de los pacientes y unificar esfuerzos entre investigadores, clínicos, autoridades nacionales e internacionales, llevando a cabo, en suma, un eficaz programa mundial de lucha contra el SIDA. (A. S.)

NEUTRINO PHYSICS, dirigido por H.V. Klapdor y B. Povh. Springer Verlag; Heidelberg, 1988.

Este libro recopila los 32 trabajos presentados en el seminario internacional sobre física del neutrino celebrado en Heidelberg del 20 al 22 de octubre de 1987. Se trata, pues, de un conjunto de artículos, dispersos en su contenido y asequibles básicamente a especialistas.

No nos hallamos, por tanto, ante un libro de divulgación, aunque sí ante una puesta al día de todo lo concerniente a la física del neutrino. Cabe decir, también, que es una puesta al día realizada en octubre de 1987, si bien no se han producido avances sustanciales desde entonces, por lo que la visión ofrecida no ha perdido actualidad en el año y medio transcurrido.

Los neutrinos, esas partículas escurridizas, y en cierto modo misteriosas, que tanto intrigan y asombran a los no expertos, y cuya comprensión tan difícil les resulta, son componentes básicos de la materia, tal y como hoy los entendemos, y desempeñan un papel central en las teorías de gran unificación (GUT). Al mismo tiempo, sus propiedades hacen de los neutrinos protagonistas indiscutibles de algunos de los fenómenos astrofísicos y cosmológicos más controvertidos y apasionantes: la actividad en el núcleo del sol y de otras estrellas, el colapso de las mismas al final de sus vidas, el fondo cosmológico de neutrinos, la materia oscura (o más propiamente transparente) del universo, etcétera.

Muchos de estos fenómenos no son del todo bien comprendidos, al menos en su detalle, debido al desconocimiento de algunas propiedades básicas de los neutrinos, singularmente el número de especies, la naturaleza de sus masas y la cuantía de las mismas. Todos los artículos contribuyen a aclarar lo que sabemos sobre todos estos puntos, lo que ignoramos, las dificultades para avanzar en su conocimiento y los nuevos proyectos experimentales.

La primera parte, dedicada a examinar el papel de los neutrinos en las GUT y en las teorías cosmológicas, es esencialmente teórica y describe los distintos modelos, que, en el marco de las GUT, asignan a los neutrinos masas que van desde 10^{-11} electronvolt hasta algunos megaelectronvolt, dependiendo de algunos de los parámetros fundamentales de cada modelo. Se analizan los distintos límites experimentales para las masas de los neutrinos, señalándose las contradicciones en los resultados de varios grupos experimentales para un mismo experimento (la desintegración β del tritio), así como la información que puede obtenerse de datos cosmológicos. Se describe igualmente la discrepancia entre los datos experimentales y las expectativas teóricas acerca del flujo de neutrinos solares, así como la más reciente y celebrada explicación propuesta para resolver dicha discrepancia. Son de destacar el artículo de Langacker, que constituye una revisión general en la que se tocan todos los aspectos, y el de Gelmini, que se centra en la relación entre neutrinos y cosmología.

La segunda parte aborda, desde el punto de vista teórico y experimental, los datos sobre las interacciones de los neutrinos y sus consecuencias sobre lo que hoy conocemos como modelo estándar de las interacciones fundamentales de la materia. Algunos de los artículos contenidos en esta parte son básicamente técnicos. Merece citarse el largo artículo de Winter que contiene una descripción general del tema.

La tercera, cuarta y sexta partes están dedicadas a examinar los experimentos presentes y futuros diseñados para esclarecer muchos de los aspectos desconocidos de la física del neutrino. Dos artículos están firmados, solos o en colaboración, por científicos españoles.

Finalmente, la quinta parte se consagra al estudio de las últimas fases en

la vida de las estrellas, especialmente las que dan origen a supernovas, y la intervención de los neutrinos en ellas. Es quizás esta parte la más novedosa, ya que incluye artículos que se refieren a los neutrinos observados en coincidencia con la aparición de la supernova SN1987A y verosímilmente procedentes del colapso que la originó. Son, si ello es así, los únicos neutrinos procedentes de fuera de nuestro sistema solar que han interaccionado en nuestros detectores. Sobresale, en esta quinta parte, el artículo de Hillebrandt, donde se pasa revista a las ideas generalmente aceptadas acerca de cómo se producen los colapsos estelares y las propiedades de los neutrinos que de ellos emergen. (C. L.)

LA PENSÉE PHILOSOPHIQUE DE MAUPERTUIS, por Giorgio Tonelli. Georg Olms Verlag; Hildesheim, 1987.

Mientras abro la primera página de la *Choix des Memoires et Abrégé de l'histoire de l'Académie de Berlin* (tomo 1.°, 1761) me viene a la memoria el lema de una colección reciente de libros publicados por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Subraya la frase programática que se trata de ofrecer los resultados de las primeras expediciones no motivadas por afanes catequéticos ni voluntad conquistadora. Es obvio que el anticlerical trasnochado que alumbró semejante "novedad" no ha leído la obra maestra de F. A. Stafleu, *Linnaeus and the Linneans* (Utrecht, 1971). Suponerle conocedor del estado de Cavanilles, Saracha, Mutis... y otros maestros de la botánica parece una temeridad. Pero al carbonario de salón del CSIC que ideó la segunda parte de esa, sobre ignorancia, necedad le traicionó su doctrinarismo militante. En efecto, y volviendo a la historia de la academia prusiana, la ilustración del poder se entendía, en el siglo XVIII europeo, como una proyección eficaz de la monarquía: "La mémoire du regne de Fédéric, premier roi de Prusse, sera toujours précieuse aux états que ont eu le bonheur de jouir de la douceur de son gouvernement... Il sentit surtout combien la culture des arts et des sciences est avantageuse à un état, et glorieuse au souverain qui la favorisse". (pp. 1 y 2). Su sucesor Federico II, nombró, a Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), presidente de la Regia Academia, con el mandato de "fijar su sede en la corte" (p. 14).

Lo primero que hizo Maupertuis fue redactar el reglamento, que el monarca aprobó con su sello. De acuerdo con el mismo, la academia quedaba dividida en cuatro clases: la de filosofía experimental, que abarcaba química, anatomía, botánica y "todas las ciencias que se fundamentan en la experiencia"; la de matemáticas, que comprendía el estudio de la geometría, álgebra, mecánica, astronomía y "todas las ciencias que tienen por objeto la extensión abstracta o los números"; la de filosofía especulativa, que se aplicará a la física y a la moral, y, por último, la clase de bellas artes, que incluirá la investigación de las antigüedades, la historia y las lenguas. En ninguna de ellas será Maupertuis un profano, lo que, por otro lado, no constituía especial rareza en un mundo de saberes enciclopédicos y de amplia inquietud.

Para acercarse a su figura sigue siendo punto de apoyo no superado la obra de P. Brunet, *Maupertuis, I. Etude biographique*. No puede decirse lo mismo del segundo tomo, *L'oeuvre et sa place dans la pensée scientifique et philosophique du XVIII^e^ siècle*. (Ambos, en París 1929.) En primer lugar, porque el conocimiento de un autor nunca es cabal hasta que no se leen con detenimiento sus escritos, y esa labor es siempre personal. Para facilitarlo, existe una reproducción anastática de la edición de 1768 de las *Oeuvres* de Maupertuis en la editorial Olms Verlag (Hildesheim, 1964-1975). En segundo lugar, porque ha pasado bastante agua bajo los puentes desde el trabajo benemérito de Brunet.

En lo concerniente a la física, el propio Brunet escribiría más tarde un *Etude historique du principe de la moindre action* (París, 1938). Maupertuis entendía la acción como el producto de la masa, la velocidad y el espacio recorrido, si bien su idea de la variación de esa acción resulta un tanto imprecisa. Para él, cuanto ocurre en la naturaleza ocurre de suerte tal que la acción sea mínima. Se trata, el principio de mínima cantidad de acción, de un concepto que él reformula en distintas ocasiones y sometido, a su vez, a distintas interpretaciones por los contemporáneos (Euler, por ejemplo) y posteriores. Sobre esto y las leyes del movimiento en Maupertuis no parece que se haya avanzado grandemente desde la *Dynamique et métaphysique leibnitiennes* (París, 1934). Por fin, otra obra de Brunet (*L'introduction des theories de Newton en France au XVIII^e^ siècle*, París 1931) nos sitúa en las resistencias que encontraron las ideas newtonianas –la atracción universal– en un ambiente francés dominado por el cartesianismo, con las misiones consiguientes para determinar la figura de la tierra y la influencia que en ello ejerció el maupertesiano *Discours sur la figure des astres*.

La biología de Maupertuis, aunque de amplia ramificación en la teoría de la cadena de los seres, anatomía y otros, se ha estudiado sobre todo en relación con la embriología y la genética a partir de su *Venus physique*. El núcleo de la misma es el debate entre preformacionismo y epigenismo. De la física y la biología de Maupertuis tiene el lector español una premiosa muestra, obligada quizá por las propias limitaciones de la colección, en *El orden verosímil del cosmos* (Madrid, 1985). Complétela con lo sugerido en el punto anterior y con los artículos del *Journal of the History of Biology*: "Maupertuis and the Eigthteenth-Century Critique of Preexistence", de Michael H. Hoffheimer (1982: 119-144) y "Pierre Louis Moreau de Maupertuis –A Precursor of Mendel?", de Iris Sandler (1983: 101-136).

Pero, por encima de todos, la visión más extensa y profunda la encontrará en *La pensée philosophique de Maupertuis*, de Giorgio Tonelli, sólido especialista en filosofía del XVIII y autoridad indiscutida en nuestro hombre. El libro no llegó a terminarlo, y de ello se ocupó su discípulo Claudio Cesa, quien se encargó de componerlo, la segunda parte en especial, con sus notas manuscritas. Divídese la monografía en dos partes: vida y obra, la primera, y el lugar de Maupertuis en la historia del pensamiento y fuentes de sus doctrinas, la segunda. No es libro que se lea de un tirón. Cada frase está troquelada. Y pide cierto esfuerzo si no queremos perdernos en la tersura de la exposición. Conceptos como extensión, duración, cualidades primarias, sustancia, percepción, teleología, necesidad, sujeto, sensación, propiedades compuestas... piden algo más que el uso de un diccionario ideológico. Mas, por otro lado, resultan imprescindibles para comprender su física, biología y matemática. La génesis de esas nociones se explican en la segunda parte, con una hondura que, en no pocos casos, ni siquiera alcanzan las historias de la filosofía al uso. Al reseñante le ha venido muy bien leer el libro varias veces y no siempre de principio a fin; empezar por el fundamento histórico y pasar luego a la exposición de las doctrinas ayuda bastante. Quizás a otros lectores pueda aprovecharles también esa experiencia (L. A.)

Apuntes

Una de las notas distintivas de la ciencia es su carácter predictivo. En 1973, G. R. Kuiper anunciaba la posibilidad de existencia de sulfhídrico en los polos de Io, satélite de Júpiter. Mediante técnicas espectrográficas de infrarrojos se ha confirmado este año de 1989 esa ocurrencia, la primera que se da fuera de nuestro planeta. No se sabe todavía si tiene un origen interno, los volcanes del satélite, o externo, la magnetosfera de Júpiter.

Entre los insectos sociales, y las hormigas lo son, la comunidad pivota en torno a la capacidad de arrastre de la reina. (El ''carisma'' de los líderes políticos.) Esa capacidad tiene su expresión química en el olor que despiden. Las sociedades fuertemente trabadas poseen sólo una reina, y se llaman monóginas. Por contra, las sociedades políginas, que tienen más de una reina, se caracterizan por desarrollarse con menos orden y sin lazos tan estrechos. Además, las obreras de las sociedades monóginas suelen cebar mejor a sus reinas que las de las sociedades políginas; de estas últimas tenemos un ejemplo claro en la especie *Iridomyrex humilis* (Mayr), cuya población ha de repartirse sus desvelos entre varias coronadas.

En una población que se reproduce sexualmente los genes procedentes de individuos distintos convergen en un descendiente. Se construyen, pues, nuevos genotipos. En ese proceso intervienen la segregación y la recombinación; en virtud de la primera, los cromosomas homólogos se separan para crear gametos haploides; en virtud de la segunda, los gametos del nuevo sujeto poseen una distribución de sus alelos distinta de la que ofrecen los alelos progenitores. Segregación y recombinación ocurren durante la meiosis. Hasta ahora, se venía primando la recombinación en las teorías de la evolución del sexo. El desarrollo de la genética cuantitativa pone de manifiesto que la segregación aporta una ventaja espectacular por sí sola: la selección puede operar sobre una mutación, frente a las dos requeridas en una población partenogenética.

A *Investigación y Ciencia* le ha nacido otro hermano. *Scientific American* se publica, con las debidas incorporaciones de la investigación de los distintos países editores, en italiano, japonés, francés, alemán, chino, ruso, árabe, húngaro y español. Desde este verano, los hindúes poseerán su versión nacional. El derecho a saber, venturosamente, se universaliza rompiendo barreras idiomáticas e ideológicas.

John N. Bahcall, de Princeton, Riccardo Giacconi, del Instituto de Ciencias Espaciales de Baltimore, Minoru Oda, de su homónimo japonés, Martin Rees, del Instituto de Astronomía de Cambridge, y Roald Sagdeev y Rashid Sunyaev, del Instituto Soviético de Investigaciones Espaciales, han firmado una carta en la que proponen el establecimiento de un centro internacional de astrofísica donde tengan cabida científicos del este y el oeste, del norte y el sur. En su opinión, el coste de miles de millones de dólares que demanda ese tipo de estudios lo aconseja. España podría recoger el guante y enmendar el error de la pérdida reciente de la oportunidad de convertirse en uno de los epicentros de la investigación biotecnológica.

La mutagénesis inducida constituye, en manos de los bioquímicos, una poderosa herramienta para estudiar los organismos, alterar el comportamiento y mejorar las características físicas de las proteínas. Sin embargo, no todo lo que reluce es oro. El sueño del bioquímico sigue siendo crear la enzima perfecta, lo mismo que el del inmunólogo es el de diseñar anticuerpos quiméricos o incluso anticuerpos catalíticos, mientras el biólogo industrial piensa en las ventajas que obtendría de la síntesis de mutantes resistentes, termoestables y estables en su *p*H. Si algunos ven ya esa realidad en la punta de los dedos, la mayoría sabe que las enzimas sintetizadas poseen, no obstante, una actividad específica o catalítica menor que el tipo silvestre o natural del que deriva el artificial.

Otro sueño de los bioquímicos es despejar la incógnita que rodea la aparición de la vida en la Tierra. La vida es, entre otras, la capacidad que tienen los organismos de reproducirse. En el dominio moleclar ello significa la replicación de la información genética, que portan los ácidos nucleicos; pero esa replicación necesita del concurso de las proteínas, codificadas o determinadas a su vez por aquéllos. El descubrimiento de los ribozomas abrió un rayo de luz en la solución de esa aporía: moléculas de ARN que poseían actividad catalítica o enzimática. Los ribozimas, sin embargo, sólo parecían operar con ARN distinto del molde propio. Se acaba de conseguir un ribozima que engarza sustratos oligonucleotídicos para producir cadenas de secuencia complementaria a la del ARN molde.